

**VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky**

Ekvalizace optického vysílače pro komunikaci viditelným světlem

**Equalization of optical transmitter for Visible Light
Communication**

2017

Lukáš Majer

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

Zadání bakalářské práce

Student:

Lukáš Majer

Studijní program:

B2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor:

2601R013 Telekomunikační technika

Téma:

Ekvalizace optického vysílače pro komunikaci viditelným světlem
Equalization of optical transmitter for Visible Light Communication

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

Komunikace pomocí viditelné oblasti světla je nový vědní obor, který využívá LED optických zdrojů světla pro komunikaci a osvětlení zároveň. Cílem této práce je změřit šířku pásma daného optického vysílače a na základě toho navrhnout, sestavit a otestovat jednoduchý filtr pro přizpůsobení šířky pásma optického vysílače.

Řešení práce spočívá ve splnění následujících bodů:

1. Podrobně nastudujte a popište problematiku komunikace viditelným světlem.
2. Zaměřte se na vysílače a jejich přenosové vlastnosti.
3. Změřte šířku pásma optického vysílače
4. Navrhněte a sestavte jednoduchý obvod pro ekvalizaci.
5. Otestujte přenosové parametry.

Seznam doporučené odborné literatury:


- [1] ARNON, Shlomi. Advanced optical wireless communication systems. Cambridge: Cambridge University Press, 2012. ISBN 9780521197878.
- [2] KAVEHRAD, Mohsen, Zhou ZHOU a M. I. Sakib CHOWDHURY. Short-range optical wireless theory and applications. Chichester, West Sussex, United Kingdom: John Wiley & Sons Inc., 2016. ISBN 9781118887707.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Tomáš Stratil**

Datum zadání: 01.09.2016

Datum odevzdání: 28.04.2017


doc. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.
vedoucí katedry





prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou/diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: 25. dubna 2017


.....
podpis studenta

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Tomáši Stratilovi za odbornou pomoc a konzultaci při vytváření této práce.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou komunikace viditelným světlem (VLC), konkrétněji ekvalizací optického vysílače pro VLC. V prvních kapitolách je tato technologie popsána od historie, přes základní principy až po jednotlivé komponenty jako zdroje světla a detektory. V práci jsou také zmíněny některé modulace popsané ve standardu IEEE 802.15.7.

Zbývá část práce je věnována měření šířky pásma optického vysílače, návrhu obvodu pro ekvalizaci s využitím dat z měření a následnému otestování přenosových parametrů s použitým ekvalizérem.

Klíčová slova

Komunikace viditelným světlem, VLC, LED, ekvalizace, optický vysílač, šířka pásma.

Abstract

This bachelor thesis deals with the issue of visible light communication (VLC), specifically by equalizing the optical transmitter for VLC. In the first chapters, this technology is described from history through basic principles to individual components as light sources and detectors. There are also some modulations described in IEEE 802.15.7.

The rest of the work is focused to measuring the bandwidth of the optical transmitter, designing the circuit for equalizing using the data from the measurement and subsequently testing the transmission parameters with the used equalizer.

Key words

Visible light communication, VLC, LED, equalization, optical transmitter, bandwidth.

Obsah

Seznam použitých symbolů.....	- 9 -
Seznam použitých zkratek.....	- 10 -
Seznam ilustrací a seznam tabulek.....	- 12 -
1 Úvod.....	- 14 -
2 Komunikace viditelným světlem (VLC).....	- 15 -
2.1 Historie.....	- 15 -
2.2 Popis VLC.....	- 16 -
2.3 Srovnání VLC s IrDA	- 17 -
2.4 Vysílače.....	- 18 -
2.4.1 LED	- 18 -
2.4.2 OLED	- 19 -
2.5 Přenos LOS, non-LOS	- 20 -
2.6 Přijímače	- 21 -
2.7 Ekvalizace VLC vysílače	- 22 -
2.8 IEEE 802.15.7.....	- 22 -
2.8.1 Topologie v IEEE 802.15.7.....	- 23 -
2.8.2 Modulace	- 24 -
3 Spektrum RGB LED	- 26 -
3.1 Měření spektra.....	- 26 -
3.1.1 RGB LED	- 26 -
3.1.2 Zdroj - HYELEC HY3020E.....	- 26 -
3.1.3 Kulový integrátor - GAMMA SCIENTIFIC GS-IS100	- 26 -
3.1.4 Spektrometr – Ocean Optics USB4000	- 27 -
3.2 Výsledky měření	- 28 -
4 PI charakteristika.....	- 30 -
4.1 Měření PI charakteristiky	- 30 -
4.1.1 Fotodetektor – THORLABS S120VC.....	- 30 -
4.1.2 Měřič výkonu – THORLABS PM100USB	- 30 -
4.2 Výsledek měření PI charakteristika RGB LED.....	- 31 -
5 Frekvenční charakteristika LED.....	- 33 -
5.1 Měření frekvenční charakteristiky	- 33 -

Seznam použitých symbolů

5.1.1	BIAS-T – Mini-Circuits ZX85-12G-S+	- 33 -
5.1.2	Síťový analyzátor - Rohde & Schwarz ZVB4.....	- 34 -
5.1.3	Fotodetektor – THORLABS PDA10A-EC	- 34 -
5.2	Výsledek měření frekvenční charakteristiky LED	- 35 -
6	Návrh ekvalizéru	- 36 -
6.1	Frekvenční charakteristika ekvalizéru.....	- 38 -
7	Frekvenční charakteristika LED s ekvalizérem.....	- 39 -
7.1	Měření frekvenční charakteristiky LED s ekvalizérem.....	- 39 -
7.1.1	Zesilovače – OPA847.....	- 39 -
7.2	Výsledky měření frekvenční charakteristiky LED s ekvalizérem.....	- 40 -
8	Modulace.....	- 41 -
8.1	Měření modulací	- 41 -
8.1.1	National Instruments USRP-2921	- 41 -
8.2	Výsledné grafy	- 42 -
	Závěr	- 44 -
	Použitá literatura	- 46 -
	Seznam příloh.....	I

Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotky	Význam symbolu
U	V	Napětí
I	A	Proud
f	Hz	Frekvence
P	W	Výkon
R	Ω	Odpor
C	F	Elektrická kapacita
E	lx	Intenzita osvětlení

Seznam použitých zkratek

Zkratka	Význam
AMP	Amplifier (Zesilovač)
CDR	Clock and data recovery (Hodiny a obnovení dat)
COB	Chip on board (čip na desce)
CSK	Color-shift keying (Klíčování barevným posunem)
DC	Direct current (Stejnoseměrný proud)
FIR	Fast IR (Rychlé IR)
GBP	Gain bandwidth product
GND	Ground (země)
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IR	Infra red (Infračervená)
IrDA	Infrared Data Association
LED	Light emitting diode (Světelná dioda)
LOS	line of sight (přímá viditelnost)
MER	Modulation error rate (Modulační chybovost)
NRZ	Non Return To Zero
NRZ-OOK	Non Return To Zero - On off keying
OLED	Organic Light Emitting Diode (Organická elektroluminiscenční dioda)
OOK	On off keying (On off klíčování)
OWC	Optical wireless communication (Optická bezdrátová komunikace)
PC	Personal computer (Osobní počítač)
PLC	Power line communication
RF	Radio frequency (Rádiové frekvence)
RGB	Red Green Blue (červená zelená modrá)
SNR	Signal Noise Ratio (Odstup signál šum)
USB	Universal Serial Bus (Univerzální sériová sběrnice)
USRP	Universal Software Radio Peripheral (Univerzální Software Radio Periferní)
UV	Ultra violet (Ultra fialová)

Seznam použitých zkratek

VFIR	Very fast IR (Velmi rychlé IR)
VLC	Visible light communication (Komunikace viditelným světlem)
VPAN	Visible light communication personal area network (Osobní síť)
VPPM	Variable pulse position modulation (Proměnlivá pulzně polohová modulace)
WLAN	Wireless local area network (Bezdrátová místní síť)
non-LOS	non-line of sight (nepřímá viditelnost)

Seznam ilustrací a seznam tabulek

Číslo ilustrace	Název ilustrace	Číslo stránky
2.1	Schéma fotofonu	15
2.2	Zobrazení barevného spektra	16
2.3	Blokové schéma VLC systému	17
2.4	Vnitřní struktura LED	19
2.5	Schéma OLED	20
2.6	Typy spojení pro VLC	20
2.7	VA charakteristika fotodiody	21
2.8	Podporované topologie standardu 802.15.7	23
2.9	OOK modulace využívající Manchester kódování	24
2.10	Proměnlivá pulzně polohová modulace	25
3.1	Blokové schéma měření spektra RGB LED	26
3.2	Vnitřní struktura spektrometru Ocean Optics USB4000	27
3.3	Změřené spektrum červené, zelené a modré LED	29
4.1	Schéma měření PI charakteristiky	30
4.2	Znázornění principu modulace v PI charakteristice	31
4.3	Změřené PI charakteristiky RGB LED	32
5.1	Blokové schéma měření frekvenční charakteristiky LED	33
5.2	Schéma zapojení ZX85-12G-S+	33
5.3	Schéma zapojení fotodetektoru THORLABS PDA10A-EC	34
5.4	Frekvenční charakteristika RGB LED	35
6.1	Obvod pro ekvalizaci optického vysílače	36
6.2	Schéma RC filtru - horní propust	37
6.3	Basic fitting frekvenční charakteristiky LED	37
6.4	Frekvenční charakteristika ekvalizéru	38
7.1	Blokové schéma měření frekvenční charakteristiky LED s ekvalizérem	39
7.2	Frekvenční charakteristiky LED s ekvalizérem a bez něj	40
8.1	Blokové schéma zapojení při měření modulací	41

8.2	Změřený graf závislosti MER na symbolové rychlosti.	42
8.3	Změřený graf odstupů signál/šum v závislosti na symbolové rychlosti.	43

Číslo tabulky	Název tabulky	Číslo stránky
2.1	Porovnání VLC a IrDA	18
2.2	Klasifikace zařízení v 802.15.7	22
2.3	Kódování Manchester	24
3.1	Specifikace detektoru TCD1304AP použitého ve spektrometru USB4000	27
3.2	Popis součástí spektrometru Ocean Optics USB4000	28
4.1	Technické údaje k přístroji THORLABS PM100USB	31
5.1	Specifikace fotodetektoru THORLABS PDA10A-EC	34
7.1	Specifikace OPA847	39

1 Úvod

V současnosti se díky neustálému vývoji čím dál více nahrazují klasická světla LED diodami. Ať už jde o pouliční osvětlení, automobilový průmysl, osvětlení v kancelářích, hromadné dopravě či domácnostech, všude se přechází na LED osvětlení, díky mnohým výhodám, kterými technologie LED disponuje. Zároveň stoupá poptávka uživatelů po rychlejším datovém přenosu, a jelikož je rádiové pásmo zpoplatněno a díky neustále rostoucímu počtu různých sítí i značně zarušeno, nabízí se řešení v podobě komunikace viditelným světlem.

Výhodou VLC je oproti rádiovým frekvencím velká šířka pásma a s tím spojená i vysoká přenosová rychlost, které lze teoreticky dosáhnout. Další výhodou je, že viditelné spektrum se nachází v bezlicenčním pásmu a nehrozí tedy žádné poplatky.

Potenciál LED diod tedy zatím není plně využit a čeká se, až bude technologie VLC zdokonalena a standardizována tak, aby bylo možné ji začít globálně využívat. Až se tak stane, dá se očekávat mnoho zajímavých produktů a aplikací této technologie.

Hlavním cílem této práce je navrhnout a sestavit jednoduchý obvod, který bude upravovat frekvenční charakteristiku optického vysílače za účelem zvětšení šířky pásma a dosažení tak lepších přenosových parametrů. Při návrhu obvodu se bude vycházet z teoretických poznatků a naměřených hodnot. Sestrojený ekvalizér poté bude změřen, porovnán se simulacemi a nakonec bude otestován jeho vliv na přenosové vlastnosti.

2 Komunikace viditelným světlem

V následujících několika kapitolách je popsána teorie komunikace viditelným světlem od její historie, přes jednotlivé části jako vysílače a přijímače, až po standard pro VLC a modulace.

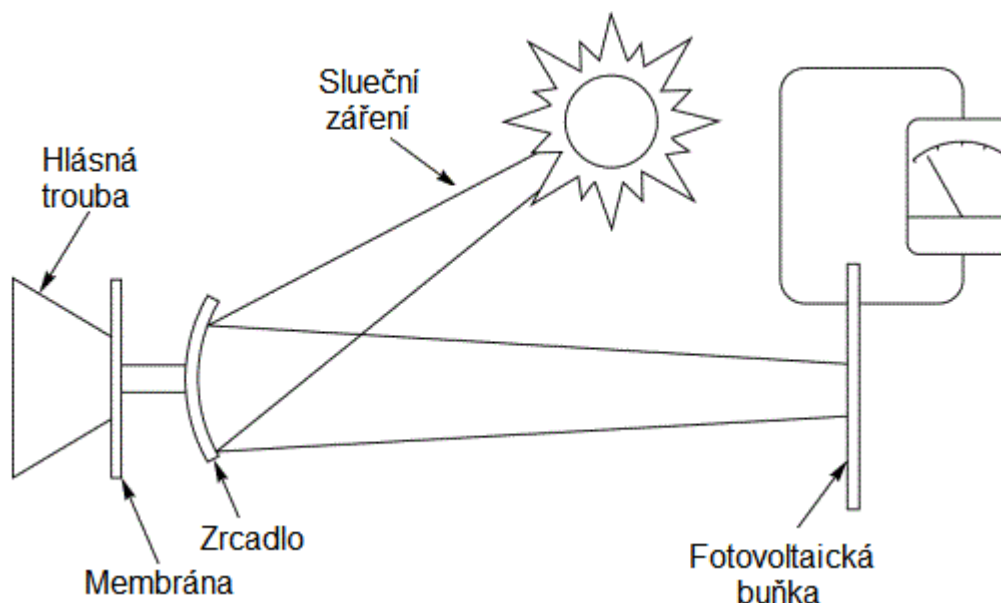
Obecně se pojmem komunikace viditelným světlem rozumí přenos dat za pomoci optického vysílače - tedy zdroje světla, který pracuje ve viditelném spektru. Opačným příkladem by mohla být komunikace IrDA, kde se využívá infračerveného záření, které není lidským okem viditelné.

2.1 Historie

Historie komunikace viditelným světlem sahá až do osmdesátých let devatenáctého století, kdy americký profesor skotského původu Alexander Graham Bell vynalezl tzv. fotofon, který přenášel zvuk pomocí měnící se intenzity paprsku světla na vzdálenost až 200 metrů. Bell označil fotofon za svůj největší vynález, ještě významnější než telefon. Schéma fotofonu je znázorněno na obrázku 2.1 [1]

Pokud se však podíváme ještě dále, lze najít zmínky o tom, že už kolem roku 1200 př. n. l. Řekové využívali ohňové signály, aby informovali Řecko o svém vítězství při dobývání města Troja. Další využití světla k signalizaci bylo okolo roku 300 př. n. l. v Alexandrijském majáku, který sloužil k usnadnění navigace na moři. Ve dne se využívalo odražení slunečního světla a v noci ohně.

Moderní komunikace viditelným světlem však nemá tak dlouhou historii. Teprve v roce 1999 byl v Hong Kongu představen systém, který pomocí bílé LED diody dokázal přenášet zvukovou stopu a aktivního výzkumu se tato technologie dočkala až v roce 2005. Dalším milníkem v historii VLC je rok 2009, kdy IEEE začala vytvářet standard pro VLC s označením 802.15.7. [2]

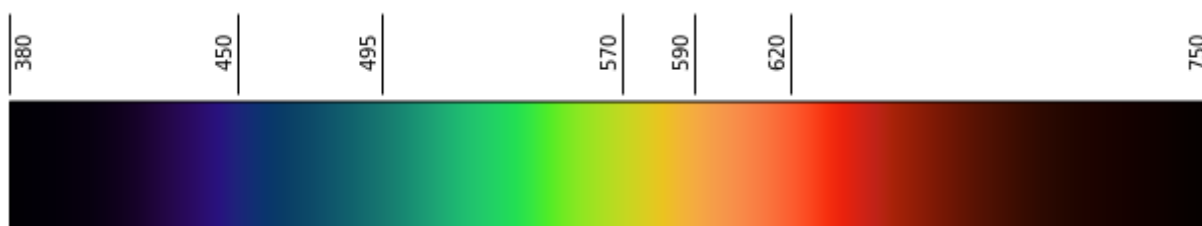


Obrázek 2.1: Schéma fotofonu

2.2 Popis VLC

Komunikace viditelným světlem spadá do podmnožiny optické bezdrátové komunikace, OWC však na rozdíl od VLC využívá ke komunikaci IR a UV záření. VLC je tedy označení pro technologie využívající viditelné světlo jako médium pro přenos dat a zároveň i k osvětlení.

V dnešní době se čím dál více využívá LED diody ať už pro osvětlení uvnitř budov, v pouličním osvětlení, nebo i v automobilovém průmyslu a to především díky jejich dlouhé životnosti a nízké spotřebě. Všechny tyto LED diody pracující ve viditelném pásmu od 380 nm do 750 nm (viz obrázek 2.2), mohou být tedy použity ke komunikaci viditelným světlem. Na straně přijímače lze v zařízeních realizovat přijímač pomocí křemíkové fotodiody, vyznačující se dobrou citlivostí v oblasti viditelného světla. Prostředí, kterým se šíří informace je tvořeno vzduchem. [3]



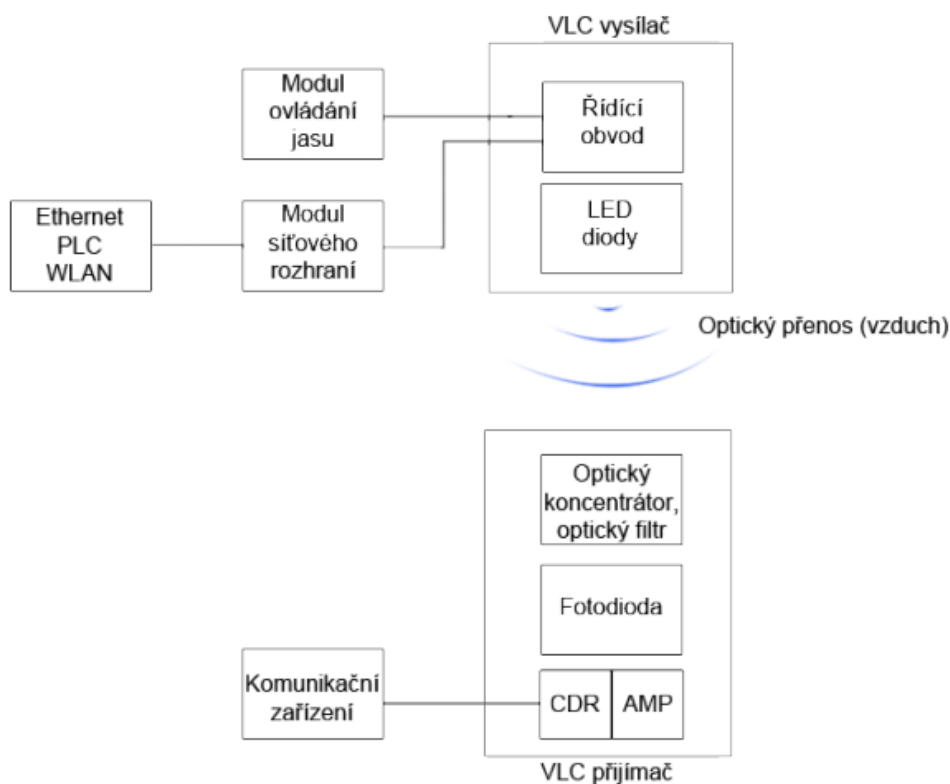
Obrázek 2.2: Zobrazení barevného spektra [4]

Vývoj VLC zatím směřuje spíše k použití v interiérech, jako například kanceláře, na palubách letadel a v hromadné dopravě. Systém VLC používaný v interiérech mohl být převzat z běžné IR komunikace díky své podobnosti. Zásadní rozdíly jsou pouze v různých vlnových délkách a v dvojí funkcionalitě - svícení a zároveň komunikace. Jiné fyzikální principy související s optikou je možné využít podobně, včetně šíření světla a odrazů. [3]

I když VLC již není žádnou novinkou, je zřejmé, že tato technologie má určitý potenciál a v budoucnu by mohla doplnit rádiovou komunikaci především kvůli přehlcení rádiového pásma.

Shrnutí důležitých vlastností VLC:

- Díky rostoucí tendenci nahrazovat běžná světla LED diodami má technologie VLC čím dál větší potenciál.
- Bezpečnost - na rozdíl od rádiových signálů mohou díky viditelnosti paprsků uživatelé omezit pokrytí vysílaných dat a tím zamezit odposlouchávání např. z vedlejší místnosti.
- Nabízí široké neregulované pásmo 380 nm až 750 nm (790 - 400 THz) bez nežádoucího elektromagnetického rušení.
- Nevyužívá rádiové vlny, je tedy vhodné i do nemocnic a letadel.



Obrázek 2.3: Blokové schéma VLC systému [3]

2.3 Srovnání VLC s IrDA

Pro jasnou představu o VLC je třeba ji porovnat s technologií IrDA, ze které vychází. Obě tyto technologie se stále vyvíjí, avšak rychlost VLC na rozdíl od IrDA závisí nejen na typu modulace, ale i na šířce pásma a standardizaci na fyzické vrstvě. Maximální dosah IrDA je 3 metry, což je pro dálkové ovládání, které nejčastěji využívá tuto technologii, dostačující, avšak VLC má kvůli různým požadavkům na osvětlení možnost tuto vzdálenost několikanásobně překonat. Zdroje rušení jsou u těchto dvou technologií kvůli různým vlnovým délkám také rozdílné. Pro IrDA je zdrojem rušení okolní osvětlení obsahující infračervené světlo, pro VLC mohou být zdrojem rušení jakékoli jiné zdroje světla. Z pohledu bezpečnosti je VLC naprosto bezpečné pro zrak, neboť zdroj světla se nijak neliší od běžně používaných zářivek či LED světel. Další rozdíly mezi VLC a IrDA jsou uvedeny v tabulce 2.1.

Tabulka 2.1: Porovnání VLC a IrDA [3]

	VLC	IrDA
Přenos dat	>100Mb/s (podle LED)	4Mb/s(FIR) 16Mb/s (VFIR)
Status	Ve výzkumu, Standardizováno v IEEE	Standardizováno (IrDA)
Dosah	Metry	3 metry
Bezpečnost	Dobrá	Dobrá
Nosná vlnová délka	Více vlnových délek (380-750 nm)	850 nm infračervená
Služby	Komunikace, osvětlení	Komunikace
Zdroje rušení	Sluneční světlo, jiné zdroje světla	Okolní osvětlení
Působení na okolí	Denní používání, bezpečné pro zrak (viditelné)	Bezpečné pro zrak při malých výkonech (neviditelné)
Použití	Vnitřní komunikace, komunikace mezi vozidly	Dálkové ovládání, bod-bod spojení

2.4 Vysílače

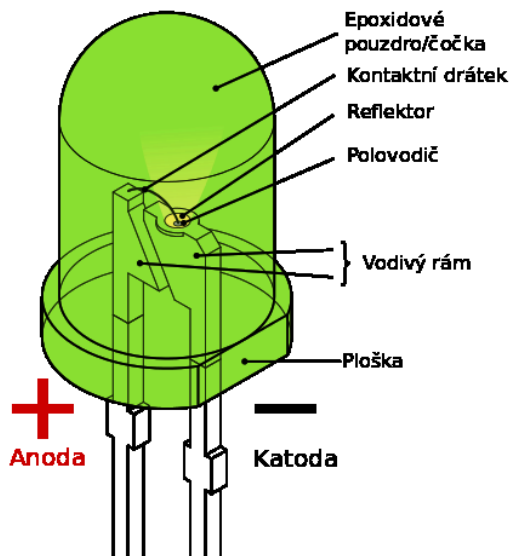
Hlavní částí vysílače VLC je obvykle LED dioda, která je díky svým vlastnostem mnohem vhodnější než například žárovka, zářivka, či laser. U vysílače VLC klademe důraz především na dobu náběhu mezi zapnutým a vypnutým stavem, díky čemuž je například klasická žárovka nepoužitelná z důvodu velké setrvačnosti záření wolframového vlákna, a nesmíme také zapomenout na potřebu osvětlovat, tudíž i laser je jako vysílač VLC naprosto nevhodný. [5]

2.4.1 LED

Na začátku šedesátých letech jediné světlo, které LED diody vyzařovaly, bylo infračervené. V roce 1962 Nick Holonyak představil první LED vyzařující viditelné světlo a už tehdy předpověděl, že v budoucnu nahradí klasické žárovky. Holonyak však pokračoval se svým týmem studentů ve výzkumu a později v roce 1972 bývalý Holonyakův student Dr. M. George Craford vytvořil první LED žluté barvy a také dokázal desetkrát zvýšit jas u červených a žluto-červených LED, dále jeho tým v roce 1977 představil také první QW laser. [6] Struktura LED je popsána na obrázku 2.4.

Zvláštním typem jsou vysoko-výkonové LED s výkonem od 500 mW až do 500 W. Tento typ je nejvíce používán u osvětlení a většina výzkumů v oblasti VLC pracuje právě s těmito vysoko-výkonovými LED. Většina elektřiny je v LED přeměněna na teplo (asi 70% teplo a 30% světla) a z toho důvodu je nezbytné jejich chlazení. Vysoké teploty nejenže snižují účinnost LED, ale snižuje se i jejich spolehlivost a životnost. [27] Dalším problémem je malá šířka pásma zejména u bílých LED využívající vrstvu luminoforu. Technologie LED využívající luminofor je podrobněji popsána v následující

kapitole. V současné době se mnoho výzkumů snaží řešit malou šířku pásma pomocí filtrů na straně přijímače, které propustí pouze rychlou - modrou složku světla. Jiným řešením je ekvalizace vysílače, za účelem zvětšení šířky pásma, což je i předmětem této práce.



Obrázek 2.4: Vnitřní struktura LED [7]

2.4.1.1 LED využívající luminofor

Jelikož LED neumí přímo emitovat bílé světlo, využívá se modré světlo a vrstva luminoforu umístěného přímo na čipu, který transformuje část světla na žluté. Smícháním těchto barev vzniká světlo bílé. Jiné typy vyzařují ultrafialové světlo a luminoforem je transformováno na bílé. [7]

Kvůli velké době odezvy luminoforu však není tato metoda vhodná pro vysokorychlostní přímé modulace a rychlost modulace je omezena na několik MHz. Řešením je použití modrého filtru na straně přijímače a tím odstranit dlouhou dobu odezvy luminoforu, toto řešení však zároveň přináší celkové snížení výkonu, menší přenosovou vzdálenost a také nám snižuje odstup signálu od šumu (SNR). [8]

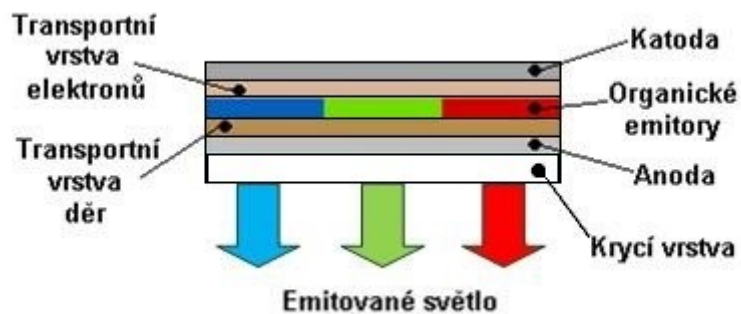
2.4.1.2 RGB LED

RGB je barevný model využívající základních barev - červené (~630 nm), zelené (~530 nm) a modré (~475 nm). Kombinací těchto barev ve správném poměru můžeme docílit požadovaného bílého světla. Princip je podobný jako u barevných monitorů či projektorů. Tato metoda je sice dražší, ale nabízí nám větší šířku pásma, tudíž je pro komunikaci vhodnější než LED využívající luminofor. [7]

2.4.2 OLED

Technologie OLED vyvinutá firmou Kodak v roce 1987 využívá organických elektroluminiscenčních diod. Mezi průhlednou anodou a kovovou katodou je několik vrstev organické látky. Přivedením napětí na diodu se začnou vytvářet kladné a záporné náboje, které se ve vyzařovací vrstvě spojí a dojde k excitaci fotonu. OLED umožňují vyzařovat bílé světlo pouze pomocí metody míchání barev RGB. Nevýhodou je krátká životnost především modrých OLED, které dosáhnou

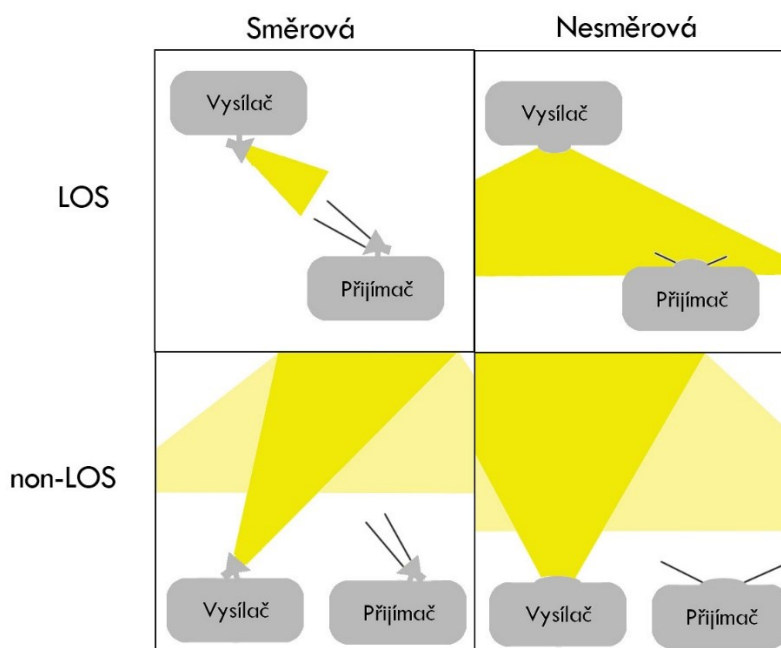
poloviny svého původního jasu již za 14 000 hodin a také malá účinnost v porovnání s LED. Výhodou by však v budoucnu mohla být možnost tisknout velké panely pokrývající i celý strop místnosti, čímž by se dosáhlo výborného osvětlení a zjednodušilo by se ovládání VLC díky řízení pouze jednoho vstupu. Výrobní cena OLED panelů je v současné době poměrně vysoká, avšak při rozšíření má tato technologie předpoklady k velice nízkým výrobním nákladům. Velikost OLED panelů je omezena pouze rozměry výrobního zařízení, v budoucnu tedy lze očekávat mnoho zajímavých aplikací této technologie, prozatím však pro VLC zůstávají prioritou klasické LED. [9]



Obrázek 2.5: Schéma OLED

2.5 Přenos LOS, non-LOS

Přenos VLC se dá rozdělit do několika kategorií v závislosti na směrovosti a existenci překážek mezi vysílačem a přijímačem. Mezi základní topologie patří směrový LOS, nesměrový LOS, směrový non-LOS a nesměrový non-LOS. Zda se jedná o směrové či nesměrové spojení lze určit podle typu vysílače a přijímače. Zda jde o LOS, nebo non-LOS je dáno tím, jestli je mezi vysílačem a přijímačem přímá viditelnost. [3]



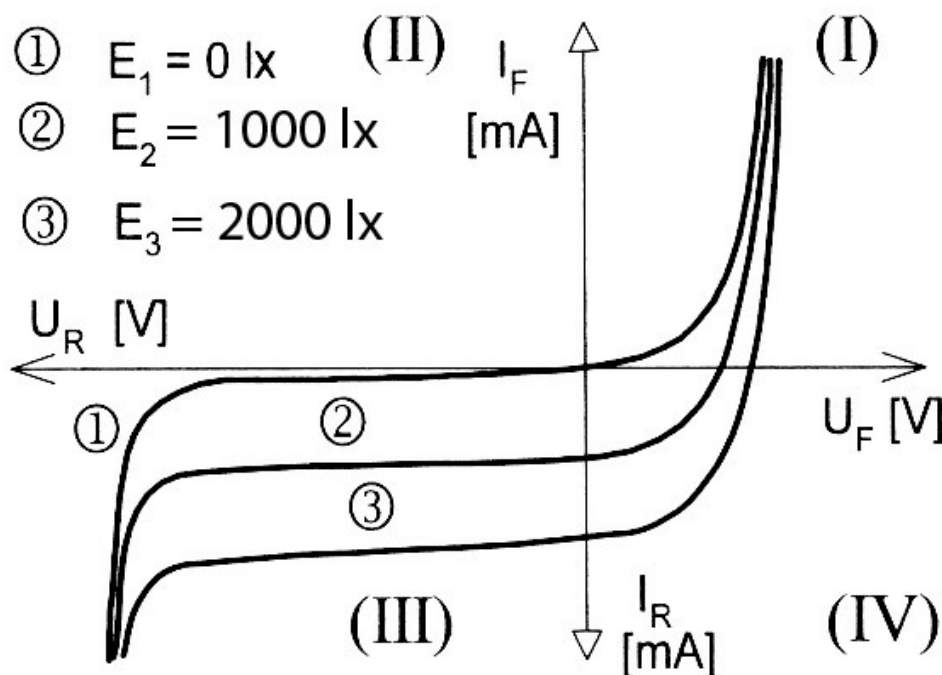
Obrázek 2.6: Typy spojení pro VLC

2.6 Přijímače

Další důležitou součástí VLC systému je přijímač, který je tvořen optickým koncentrátorem, optickými filtry, fotodetektozem, zesilovačem a obvodem pro obnovení signálu.

Fotodetektory jsou nejčastěji tvořeny fotodiodou, což je polovodičová součástka upravená tak, aby do oblasti PN přechodu mohlo proniknout světlo. Pokud na PN přechod nedopadá světlo, má voltampérová charakteristika fotodiody stejný průběh jak běžná dioda. Vliv osvětlení lze vidět v závěrném směru, kdy s rostoucím osvětlením dochází k růstu anodového proudu. Reakce na změnu osvětlení je u fotodiody velice rychlá - řádově 10^{-6} s až 10^{-9} s (u fotodiody PIN dokonce 10^{-12} s až 10^{-15} s).

VA charakteristika fotodiody, která je znázorněna na obrázku 2.7 prochází prvním, třetím a čtvrtým kvadrantem, přičemž využíváme jen třetí a čtvrtý. Ve třetím kvadrantu se fotodioda chová jako rezistor citlivý na světlo a ve čtvrtém kvadrantu funguje jako zdroj elektrické energie využívající fotovoltaiický jev. [10]



Obrázek 2.7: VA charakteristika fotodiody [10]

O kompenzaci útlumů vzniklých přenosovou trasou se stará optický koncentrátor, který shromažďuje záření a zaměřuje jej na plochu fotodetektoru. Zdrojem rušení u systému VLC může být i pouhé sluneční světlo, nebo jakékoliv jiné zdroje záření, tudíž je žádoucí před fotodetektor zařadit optický filtr propouštějící pouze požadované pásmo. [3]

2.7 Ekvalizace VLC vysílače

Ekvalizér je zařízení, nebo jeho část, upravující frekvenční charakteristiku signálu zesílením nebo potlačením některých jeho částí. Ve VLC lze pomocí ekvalizace vysílače dosáhnout větší šířky pásma a s tím spojenou větší přenosovou rychlost.

V roce 2008 bylo pomocí VLC dosaženo rychlosti 80Mbit/s právě s použitím pre-ekvalizace vysílače, modulace OOK-NRZ a bílé LED využívající luminoforu. Šířka pásma tehdy byla 45 MHz, ovšem přenos probíhal pouze na vzdálenost 10cm. Dále v roce 2012 bylo dosaženo rychlosti 614Mbit/s na vzdálenost 40cm za použití duobinární techniky a modulací založenou na OOK s červeným čipem RGB LED, s pre-ekvalizací, po-ekvalizací a šířkou pásma 150MHz. [11] Dále 10.10. 2014 se díky pre-ekvalizaci a OOK-NRZ modulaci dosáhlo modulační rychlosti 200Mbit/s s použitím bílé LED. [12] Několik dní později vyšel článek v OPTICS EXPRESS, kde za pomoci pre-ekvalizace a také po-ekvalizace na straně přijímače bylo dosaženo přenosové rychlosti 550Mbit/s. Byla zde použita OOK-NRZ modulace a bílá LED jako vysílač. [13]

2.8 IEEE 802.15.7

V roce 2009 institut inženýrů elektrotechniky a elektroniky (IEEE) založil pracovní skupinu zabývající se komunikací viditelným světlem za účelem vytvořit mezinárodní standard pro VLC využívající nelicencované pásmo. Roku 2011 tato skupina definovala první standard fyzické a MAC vrstvy pro VLC. [14] Díky tomuto standardu lze vyvíjet nové produkty a zařízení, která budou v souladu mezinárodní normou a budou schopny mezi sebou spolupracovat. Standard také definuje klíčové vlastnosti produktu, jako frekvenci blikání zdroje světla, bezpečnostní předpisy pro zrak, atd. [15]

Standard také rozděluje zařízení do 3 tříd: infrastruktura, mobil, a vozidlo, viz tabulka 2.2. Dále jsou ve standardu definovány 3 základní druhy topologií: klient-klient, hvězda a všesměrová. Celý standard 802.15.7 si lze prohlédnout zde [15].

Tabulka 2.2: Klasifikace zařízení v 802.15.7 [15]

	Infrastruktura	Mobil	Vozidlo
Pevný koordinátor	Ano	Ne	Ne
Napájecí zdroj	Dostatečný	Omezený	Slabý
Tvar	Bez omezení	Omezený	Bez omezení
Zdroj světla	Silný	Slabý	Silný
Mobilita	Ne	Ano	Ano
Dosah	Krátký/dlouhý	Krátký	Dlouhý
Rychlost přenosu dat	Vysoká/nízká	Vysoká	Nízká

2.8.1 Topologie v IEEE 802.15.7

Ve všech následujících topologiích se současně využívá i režimu tzv. podpory viditelnosti pro udržení funkce osvětlení v nepřítomnosti komunikace, nebo v přijímacím stavu, kdy se data pouze přijímají. Tento režim tedy slouží k udržování osvětlení a také potlačuje blikání vysílače. [15]

Topologie typu klient-klient

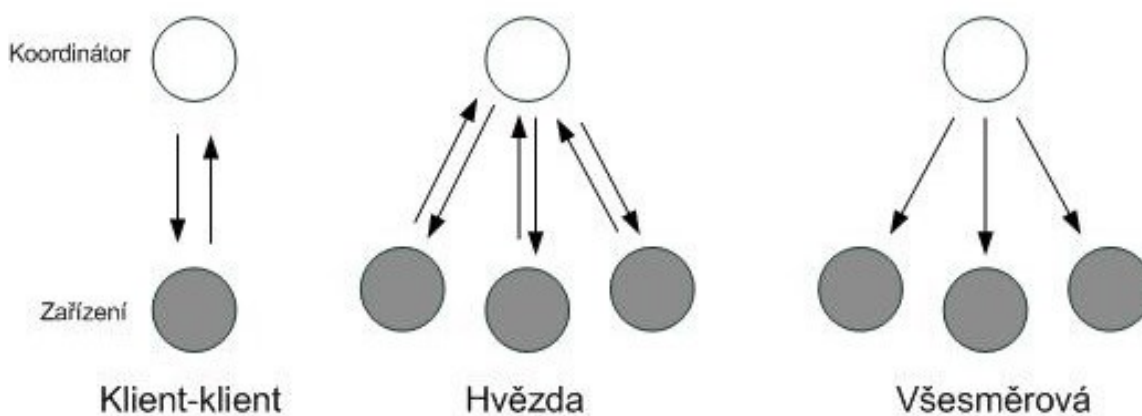
Základní struktura topologie klient-klient je znázorněna na obrázku 2.8. V topologii klient-klient je každé zařízení schopné komunikovat s jiným zařízením, které je v jeho dosahu. U topologie klient-klient má vždy jeden z účastníků komunikace roli koordinátora. Koordinátor je zvolen například tím, že jako první začne komunikovat na daném kanálu. [15]

Topologie typu hvězda

Všechny sítě v hvězdicové topologii pracují nezávisle na ostatních současně provozovaných sítích, toho je dosaženo pomocí VPAN identifikátoru, který je pro každou síť unikátní a nemůže být současně použit v žádné jiné síti. Jakmile je VPAN identifikátor zvolen, koordinátor umožní ostatním zařízením se připojit do sítě. Topologie typu hvězda je znázorněna na obrázku 2.8. [15]

Všesměrová topologie

Zařízení v tomto režimu může vysílat signál do ostatních zařízením bez nutnosti tvorby sítě. Komunikace je jednosměrná a není nutné znát cílové adresy. Všesměrová komunikace je znázorněna na obrázku 2.8. [15]



Obrázek 2.8: Podporované topologie standardu 802.15.7

2.8.2 Modulace

Modulace je proces, při kterém se mění charakter nosného signálu pomocí signálu modulujícího. Modulace se často využívá při přenosu elektrických či optických signálů. Nosným signálem může být například harmonický sinusový signál. [16]

U modulací jsou důležité tyto základní parametry[16]:

- Šířka pásma - nejčastěji se používá šířka pásma pro danou úroveň - konkrétně 3dB.
- Modulační rychlost - označuje počet přenesených symbolů za 1 sekundu.
- Přenosová rychlost - udává počet bitů přenesených za 1 sekundu.
- Poměr signál/šum - v základním pásmu se značí jako SNR, pro modulované signály CNR.
- Bitová chybovost (BER) - poměr průměrného počtu chybných bitů k celkovému počtu bitů přenesených za určitý časový interval.
- Symbolová chybovost (SER) - poměr průměrného počtu chybných symbolů k celkovému počtu symbolů, přenesených za určitý časový interval.

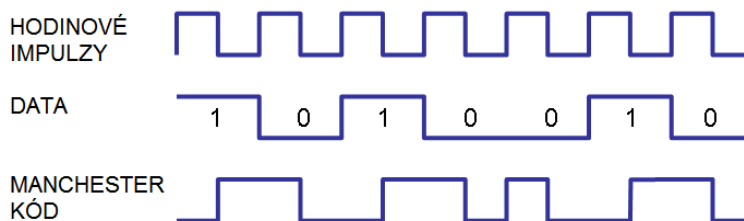
Jelikož VLC využívá jako zdroj světla LED diody, je nutné, aby modulační schéma pro VLC obsahovalo modul ovládání jasu (resp. stmívání). Z tohoto důvodu jsou ve standardu 802.15.7 definovány následující modulace.

ON-OFF klíčování

Data jsou při OOK modulaci reprezentována zapnutým (ON) a vypnutým (OFF) stavem. Výhodou této modulace je její jednoduchost a rychlost. Standard využívá Manchester kódování, které rozšíří každý bit na dvoubitový symbol (viz tabulka 3), což zajistí stejný počet kladných a záporných impulzů. [15]

Tabulka 2.3: Kódování Manchester

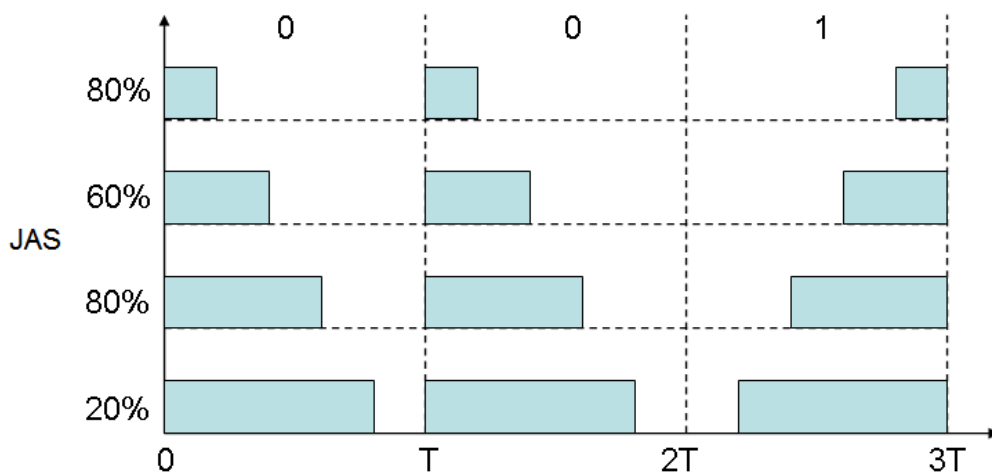
Bit	Manchester symbol
0	01
1	10



Obrázek 2.9: OOK modulace využívající Manchester kódování

Proměnlivá pulzně polohová modulace

Jak lze vidět na obrázku 2.10, VPPM modulace kóduje data změnou délky pulzu v jedné periodě, přičemž amplituda pulzů zůstává stejná. Délka jedné periody musí být dostatečně velká pro rozlišení mezi dvěma stavy. Logická 0 je reprezentována kladným pulsem na začátku a nulovým pulzem po zbytek periody, přičemž délkou pulzu ovládáme jas. [15]



Obrázek 2.10: Proměnlivá pulzně polohová modulace

Klíčování barevným posunem

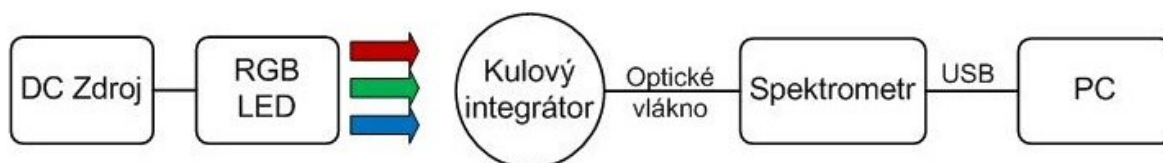
CSK využívá míchání RGB kanálů k zakódování přenášených dat, což znamená, že jako vysílač je třeba použít LED využívající RGB technologii. Standard definuje 4, 8 a 16 stavovou CSK. Tato metoda je složitá na konstrukci, což je její jediná nevýhoda. Výhodou je, že informace je reprezentována barvou světla, přičemž amplituda zůstává konstantní a tím i průměrný výkon zdroje světla zůstává konstantní. Tím se snižuje riziko zdravotních komplikací u lidí trpících epilepsií nebo u lidí citlivých na výkyvy intenzity světla. [15]

3 Spektrum RGB LED

Tato kapitola je věnována měření spektra RGB LED, která bude využívána jako vysílač pro komunikaci viditelným světlem. Je zde popsán postup měření včetně jednotlivých přístrojů, které byly při měření použity.

3.1 Měření spektra

Pracoviště pro měření spektra bylo zapojeno dle blokového schématu na obrázku 3.1, kde bylo použito stejnosměrného zdroje k napájení LED diod. Kulový integrátor byl použit pro sběr optických paprsků z LED, odkud se optickým vláknem světlo přeneslo do spektrometru, kde se pomocí lineárního snímače obrazu světlo zpracovalo na data. Data poté byly pomocí USB přeneseny do PC, kde za použití speciálního softwaru SpectraSuite byly zpracovány do grafu. Výsledný graf je na obrázku 3.3. Jednotlivé komponenty použité při měření jsou popsány níže.



Obrázek 3.1: *Blokové schéma měření spektra RGB LED*

3.1.1 RGB LED

Použitá LED dodaná vedoucím práce je stejná u všech měření, jedná se o COB LED obsahující 3čipy od každé barvy, dohromady tedy 9LED čipů. K LED bohužel není dostupná žádná podrobná dokumentace, jediné informace poskytnuté výrobcem je maximální proud 330 mA pro jednu barvu a výkon 10 W.

3.1.2 Zdroj - HYELEC HY3020E

Jde o laboratorní zdroj s plynulou regulací napětí (0-30V) i proudu (0-20A). Přístroj nabízí hrubé i jemné ovládání a pracuje s přesností 1,5%. Přesnost indikace napětí je $\pm 1\%$ +2 digity, přesnost indikace proudu $\pm 2\%$ +2 digity.

3.1.3 Kulový integrátor - GAMMA SCIENTIFIC GS-IS100

Integrační koule se běžně používá k měření účinnosti svítidel. Využívá mnohonásobných odrazů uvnitř koule k osvětlení fotocitlivého prvku, který je v tomto případě umístěn mimo kouli v jiném zařízení, s kterým je kulový integrátor propojen pomocí optického vlákna.

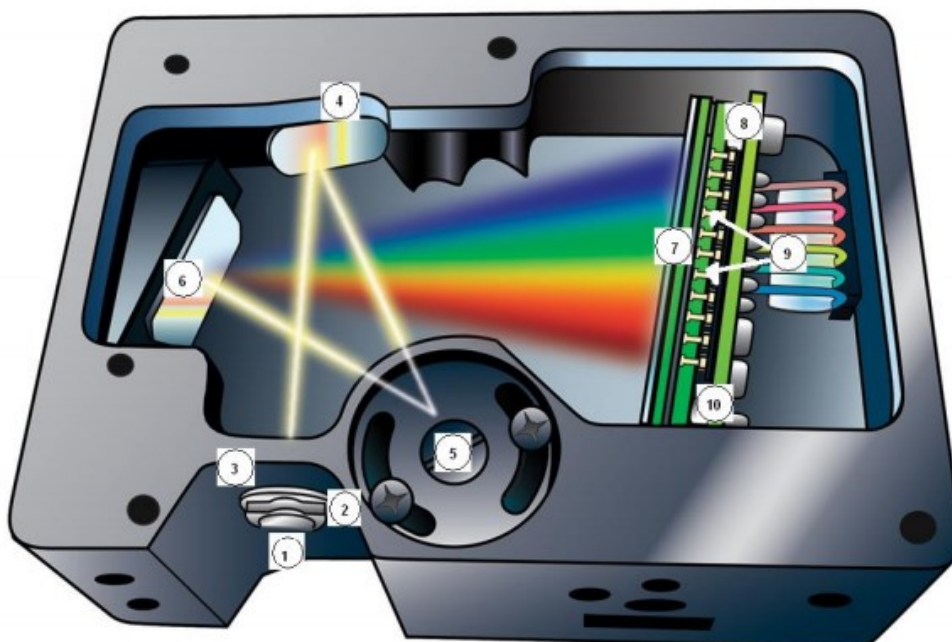
3.1.4 Spektrometr – Ocean Optics USB4000

Zařízení pracuje v pásmu 200 - 1100 nm, konkrétní rozsah a rozlišení závisí na nastavení optické mřížky a volbě vstupní štěrby. Přístroj je napájen pomocí USB, není tedy třeba externího zdroje, což zjednodušuje manipulaci s přístrojem.

Princip tohoto spektrometru spočívá v rozkladu světla pomocí zrcadel a optické mřížky a jeho následné detekci pomocí senzoru Toshiba TCD1304AP, jehož podrobné specifikace jsou uvedeny v tabulce 3.1. Princip spektrometru je také znázorněn na obrázku 3.2 a podrobný popis jednotlivých součástí je v tabulce 3.2 [17]

Tabulka 3.1: Specifikace detektoru TCD1304AP použitého ve spektrometru USB4000

Specifikace	Hodnota
Detektor	Toshiba TCD1304AP lineární CCD pole
Počet prvků	3648 pixelů
Velikost pixelu	8 μm x 200 μm
Poměr signál/šum	300:1 (při plném signálu)
Rozlišení A/D převodníku	16 bitů



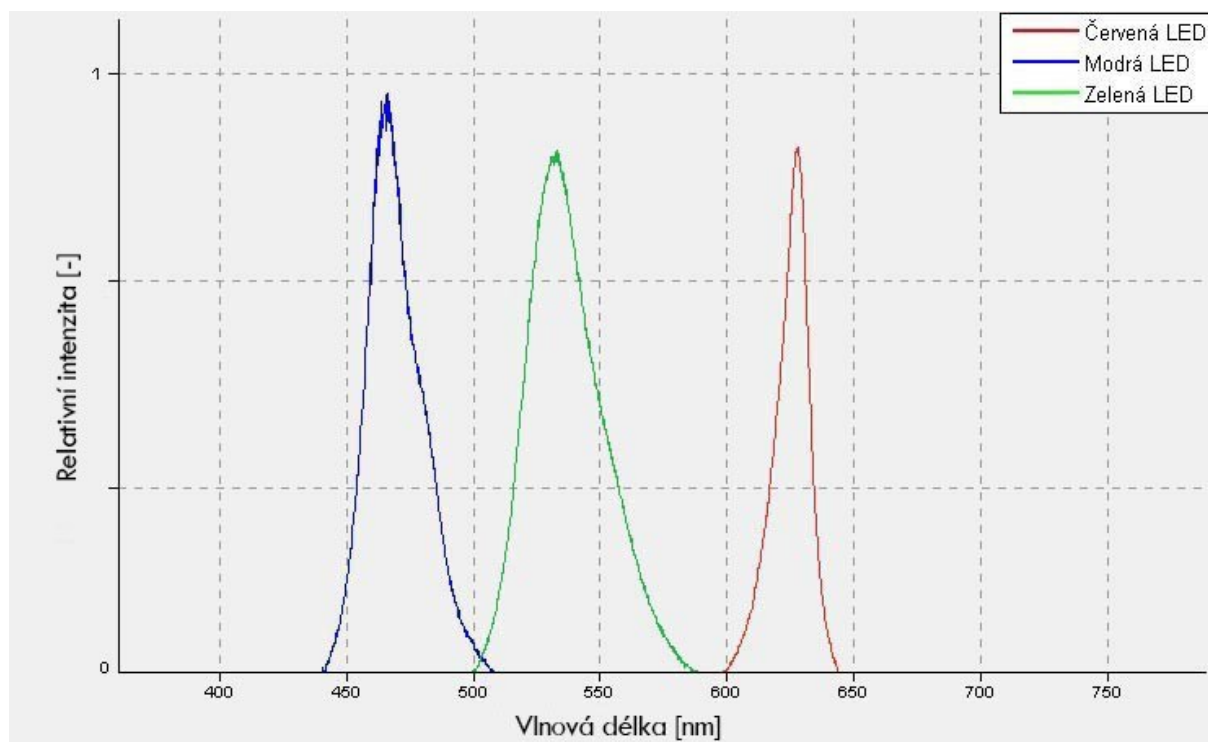
Obrázek 3.2: Vnitřní struktura spektrometru Ocean Optics USB4000 [17]

Tabulka 3.2: Popis součástí spektrometru Ocean Optics USB4000 [17]

Označení	Název	Popis
1	SMA905 konektor	Zabezpečuje správné připojení vlákna do spektrometru
2	Štěrbina	Tmavý kus materiálu s obdélníkovým otvorem umístěný za SMA konektorem. Reguluje množství vstupujícího světla. Velikost otvoru (5 - 200 μm).
3	Filtr	Omezuje optické záření na předem určené oblasti vlnových délek.
4	Kolimační zrcadlo	Zaostřuje světlo směřující do roštu.
5	Optické mřížka	Ohýbá přicházející světlo od kolimačního zrcadla a směřuje jej na zaostřovací zrcadlo
6	Zaostřovací zrcadlo	Zaostřuje světlo přicházející z mřížky a směřuje jej na detektor
7	L4 Čočka	Volitelná součástka - připojuje se k detektoru pro zvýšení účinnosti
8	Detektor	Sbírá světlo přijímané ze zaostřovacího zrcadla
9	OFLV filtry	Volitelná součástka - speciální filtry Ocean Optics
10	Vylepšený detektor	Standardní okno detektoru je nahrazeno krystalovým oknem na zvýšení výkonu spektrometru (<340 nm). Volitelné vylepšení

3.2 Výsledky měření

Z výsledného grafu je zřejmé, že modrá LED pracuje v rozmezí 460-480 nm, zelená LED 520-550 nm a červená LED 620-635 nm. Červená LED tedy disponuje nejmenší šířkou pásma, naopak u zelené je šířka pásma největší. Podstatnou informací také je, že jednotlivá spektra se nepřekrývají, tudíž můžeme vysílat každou barvou zvlášť. Jedinou podmínkou při realizaci tohoto řešení by bylo zařazení filtrů na straně přijímače propouštějící jen požadované vlnové délky.



Obrázek 3.3: Změřené spektrum červené, zelené a modré LED

4 PI charakteristika

Tato kapitola popisuje postup při měření PI charakteristiky, jsou zde zmíněny i přístroje použité při tomto měření a je zde popsán i princip modulace a vliv pracovního bodu na modulace. Díky změřením PI charakteristiky budeme schopni určit vhodný pracovní bod LED s ohledem na modulace.

4.1 Měření PI charakteristiky

Při měření PI charakteristiky se vycházelo z blokového schématu na obrázku 4.1. K měření proudu byl použit ampérmetr RANGE DMM RE95 zapojený do série mezi stejnosměrný zdroj HYELEC HY3020E a měřenou LED. K měření výkonu byl použit fotodetektor THORLABS S120VC připojený k měřiči výkonu a pomocí speciálního softwaru Thorlabs Optical Power Meter Utility určeného pro řízení a záznam výsledků z měřiče optického výkonu se v počítači zaznamenávaly hodnoty. Ty byly dále zpracovány v programu MATLAB a kvůli malému počtu změřených hodnot byl pro lepší přehlednost použit nástroj basic fitting, který křivky vyhladí, díky čemuž je vidět, které hodnoty nekorespondují se zbytkem grafu (resp. leží mimo křivku), což je na obrázku 4.3 pro lepší viditelnost přiblíženo. DC zdroj byl použitý stejný jako v předchozím měření tedy HYELEC HY3020E. Ampérmetr byl při měření nastaven na rozsah 400 mA a 20 A. Přesnost ampérmetru při rozsahu 400 mA je $\pm 1.5\%$ z naměřené hodnoty, $\pm 1.2\%$ z celého rozsahu ± 3 digitů, pro rozsah 20 A je výrobcem uváděna přesnost $\pm 2.5\%$ z naměřené hodnoty, $\pm 2.0\%$ z celého rozsahu ± 5 digitů. Podrobnější popis použitých přístrojů se nachází níže.



Obrázek 4.1: Schéma měření PI charakteristiky

4.1.1 Fotodetektor – THORLABS S120VC

Tento fotodetektor využívá vysoce citlivé křemíkové fotodiody vyznačující se rychlou odezvou menší než $1\ \mu\text{s}$ a vysokým rozlišením 1 nW . Rozsah vlnových délek je $200\text{--}1100\text{ nm}$ a rozsah výkonu je $50\text{ nW} - 50\text{ mW}$. Detektor je také vybaven senzorem teploty varujícím před přehřátím, který je realizován NTC termistorem o hodnotě $4.7\text{ k}\Omega$. Nejistota měření závisí na rozsahu vlnových délek - pro $440 - 980\text{ nm}$ je nejistota $\pm 3\%$, pro $280 - 439\text{ nm}$ $\pm 5\%$, pro $200 - 279\text{ nm}$ a $981 - 1100\text{ nm}$ je to $\pm 7\%$. [18]

4.1.2 Měřič výkonu – THORLABS PM100USB

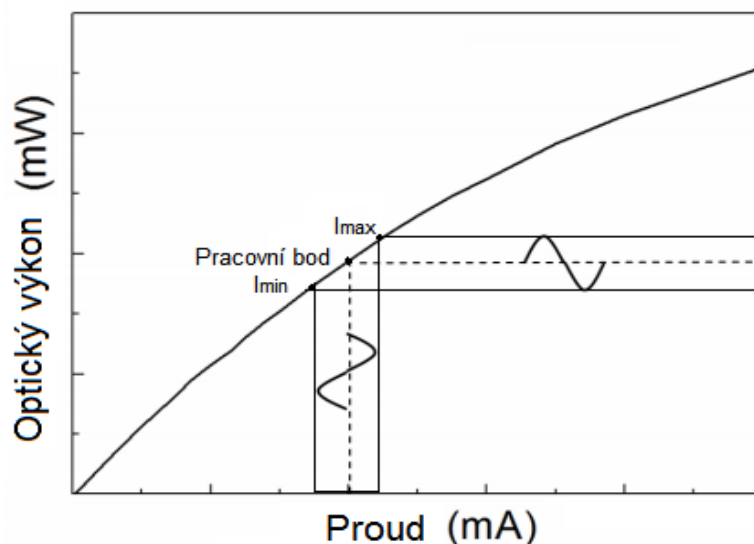
Tento měřič optického výkonu a energie je navržen pro měření laserů a jiných zdrojů světla. Přístroj podporuje velké množství senzorů, které je možné připojit v závislosti na typu měřeného zdroje světla. Měřič navržen pro připojení k PC, data se do počítače přenáší přes USB rozhraní, které je zároveň určeno k napájení zařízení. Podrobnější technické údaje se nachází v tabulce 4.2. [19]

Tabulka 4.1: Technické údaje k přístroji THORLABS PM100USB [19]

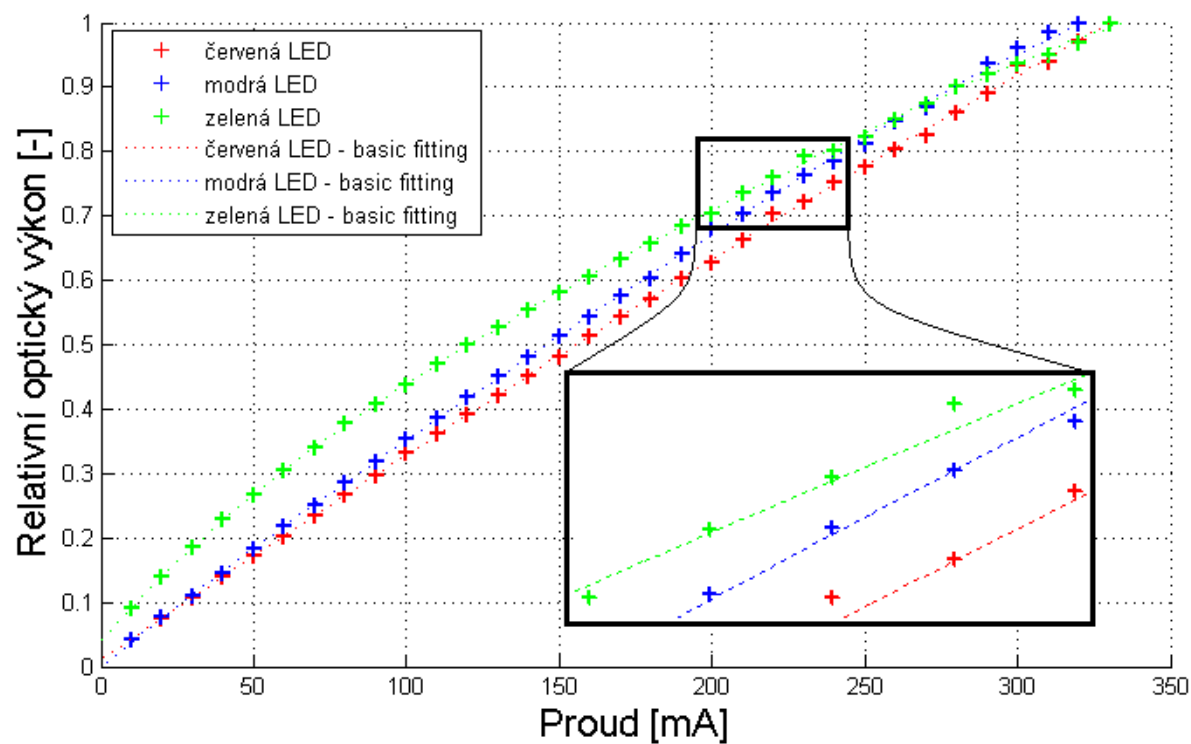
Fotodiodový senzor	
Konektor	DB9F
Jednotky	$W, dBm, W/cm^2, A$
Rozsah	6 dekád: 50 nA-5 mA
Rozlišení	1 pA
AD převodník	16 bitový
Přesnost	$\pm 0.2 \%$ rozsahu (5 μA - 5mA) $\pm 0.5 \%$ rozsahu (50nA)

4.2 Výsledek měření PI charakteristika RGB LED

Na obrázku 4.3 se nachází výsledný graf závislosti proudu na optickém výkonu. Z grafu je patrné, že všechny měřené LED mají víceméně lineární charakteristiku, což nám dovoluje pomocí stejnosměrného proudu zvolit vhodný pracovní bod LED v maximu její PI charakteristiky a tím docílit větší šířky pásma a většího optického výkonu, což bude mít také pozitivní vliv na vzdálenost, po které budeme schopni přenášet data. Dále je zřejmé, že charakteristika zelené LED se od červené a modré LED mírně liší, při napájení LED proudem 100 mA by tedy zelená LED poskytla vyšší relativní optický výkon, než červená a modrá. Princip modulace a vliv pracovního bodu je znázorněn na obrázku 4.2.



Obrázek 4.2: Znázornění principu modulace v PI charakteristice



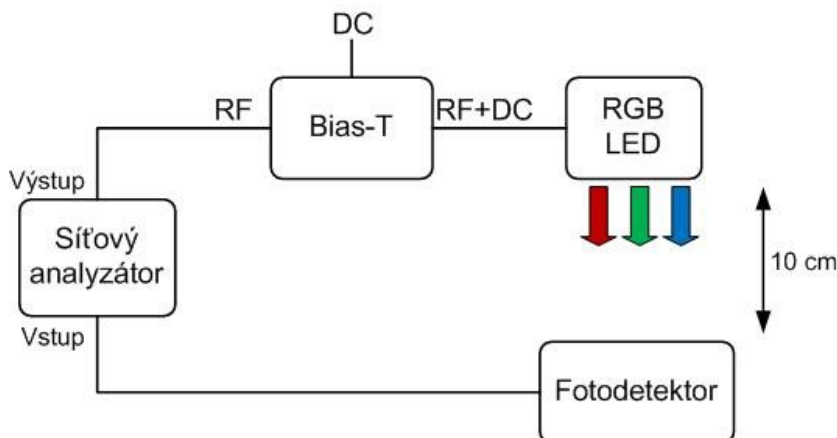
Obrázek 4.3: Změřené PI charakteristiky RGB LED

5 Frekvenční charakteristika LED

Tato kapitola popisuje měření frekvenční charakteristiky, která bude následně ekvalizérem upravována za účelem získání větší šířky pásma a lepších přenosových parametrů. Této charakteristiky bude také využito v následující kapitole při návrhu obvodu. Také jsou zde podrobně popsány i přístroje použité při měření.

5.1 Měření frekvenční charakteristiky

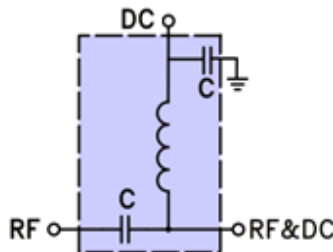
K měření frekvenční charakteristiky byl použit síťový analyzátor Rohde & Schwarz ZVB4 zapojený dle schématu na obrázku 5.1. Na výstupu síťového analyzátoru se nachází rádiové frekvence, které se v Bias-T Mini-Circuits ZX85-12G-S+ spojí s napájecím napětím pro LED. Na vstup síťového analyzátoru byl připojen fotodetektor THORLABS PDA10A-EC vzdálený 10 cm od měřených diod. Přijatý signál se v analyzátoru zpracuje a ze získaných dat je vytvořen graf, nebo mohou být data vyexportována a zpracována v počítači. Výsledky měření jsou na obrázku 5.5.



Obrázek 5.1: Blokové schéma měření frekvenční charakteristiky LED

5.1.1 BIAS-T – Mini-Circuits ZX85-12G-S+

Tento obvod se vyznačuje velkou šířkou pásma 0.2 - 12 000 MHz, nízkým útlumem 0.6 dB, proudovou zatížitelností až 400mA. Schéma vnitřního zapojení je znázorněno na obrázku 5.2. Bias-T se obvykle používá ve vysokofrekvenční technice k oddělení externího DC napájení od užitečného signálu. Ve VLC je Bias-T použit k součtu střídavé složky signálu se stejnosměrnou složkou určenou k napájení LED. [21]



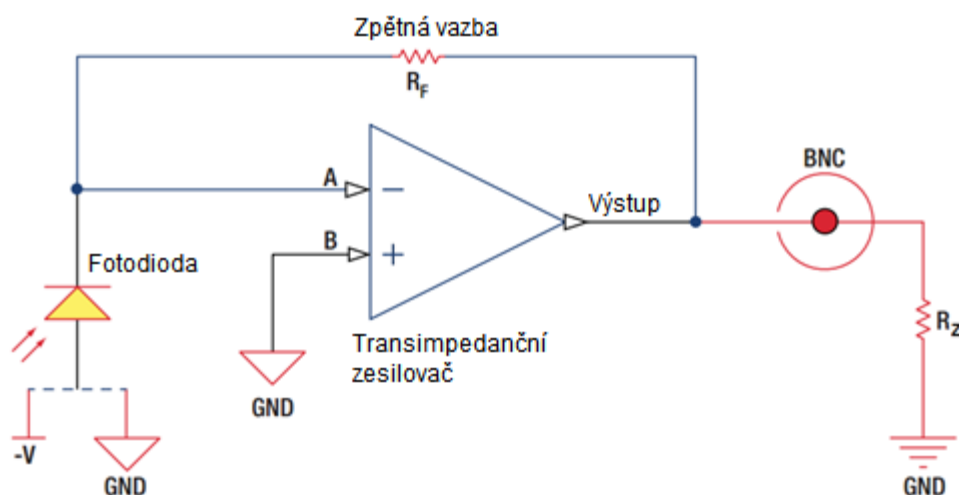
Obrázek 5.2: Schéma zapojení ZX85-12G-S+ [21]

5.1.2 Síťový analyzátor - Rohde & Schwarz ZVB4

Jde o vektorový síťový analyzátor pracující v rozsahu od 300 kHz do 4 GHz. Je navržen pro univerzální měření pasivních i aktivních součástek a zejména pro víceportové měření. Přístroj nabízí širokou škálu funkcí, vysokou rychlost měření i přenosu dat. Hlavními součástmi síťového analyzátoru jsou: Generátor signálu, testovací set, přijímač, procesor a displej. [20]

5.1.3 Fotodetektor – THORLABS PDA10A-EC

Řada přístrojů THORLABS PDA je určena k měření světelných zdrojů. PDA10A obsahuje PIN diodu v závěrné směru spojenou s transimpedančním zesilovačem, přičemž je vše zabaleno v robustním krytu. Podrobnější specifikace udávané výrobcem jsou v tabulce 5.1. Jednou z nejdůležitějších vlastností je malá aktivní plocha, díky které se během měření šířky pásma nevytváří chyba tím, že by fotodetektor sám ovlivňoval šířku pásma na přijímací straně. Kvůli malé aktivní ploše je však nutné použití čočky - konkrétně plankonvexní N-BK7 s průměrem 1 palec a ohniskem 25,4 mm. [22]



Obrázek 5.3: Schéma zapojení fotodetektoru THORLABS PDA10A-EC [22]

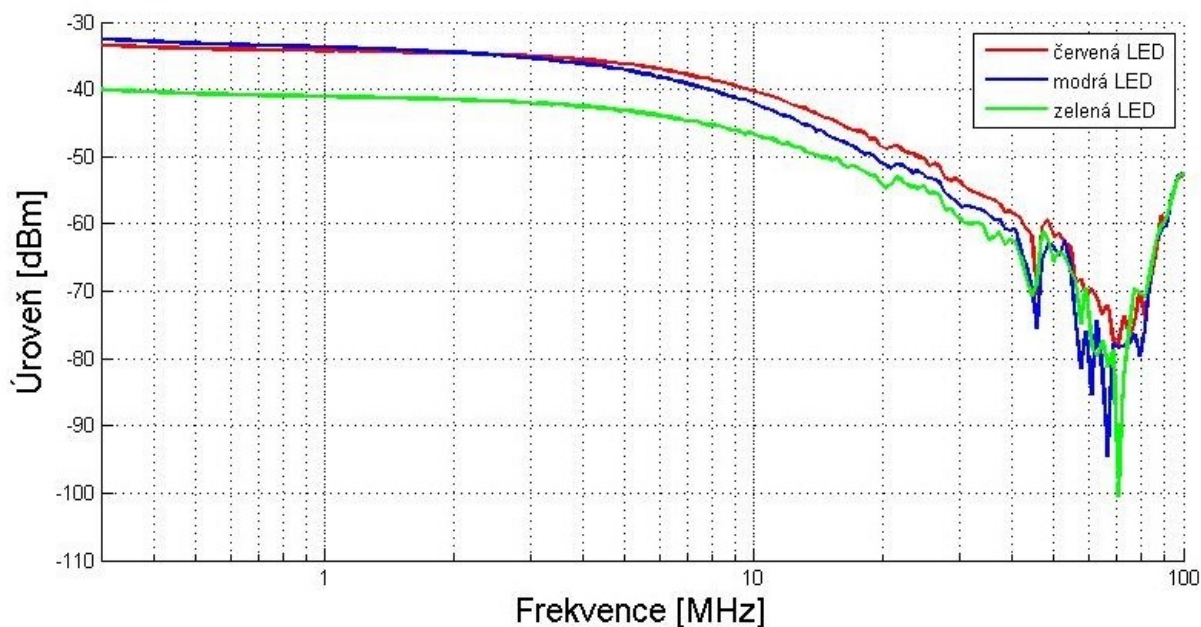
Tabulka 5.1: Specifikace fotodetektoru THORLABS PDA10A-EC [22]

Detektor		Si PIN
Aktivní plocha		Ø1 mm (0.8 mm ²)
Rozsah vlnových délek	λ	200 až 1100 nm
Vrcholová vlnová délka	λ_p	730 nm (Typ)
Maximální citlivost	$\mathcal{R}(\lambda_p)$	0.44 A/W (Typ)
NEP (λ_p)	W/ $\sqrt{\text{Hz}}$	3.5×10^{-11}

Maximální výstupní proud	I_{OUT}	100 mA
Impedanční zatížení		50 Ω to Hi-Z
Transimpedanční zisk Hi-Z 50 Ω		1 x 10 ⁴ V/A , 5 x 10 ³ V/A
Výstupní napětí	V_{OUT}	0 až 5 V (50 Ω), 0 až 10 V (Hi-Z)

5.2 Výsledek měření frekvenční charakteristiky LED

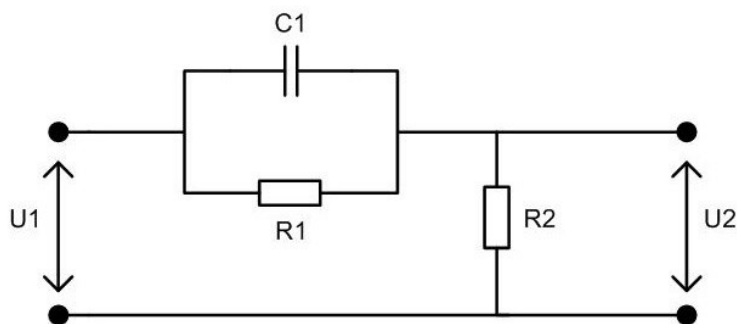
Na výsledném grafu je vidět, že dosažená šířka pásma pro hladinovou úroveň -3 dBm je 6 MHz, v této části je charakteristika lineární. Ve vyšších frekvencích charakteristika začíná prudce klesat a zároveň začíná být signál zašuměný a zkreslený, proto se budeme soustředit na frekvence do cca 30 - 40 MHz. Také je vidět, že zelená LED má v nízkých frekvencích podstatně nižší úroveň než modrá a červená LED. Mým úkolem v následující kapitole bylo sestavit obvod, který tuto charakteristiku vyrovná, čímž by se měla zvětšit šířka pásma a s tím spojená rychlost přenosu při komunikaci touto LED.



Obrázek 5.4: Frekvenční charakteristika RGB LED

6 Návrh ekvalizéru

Obvod pro ekvalizér byl vybrán z článků a literatury doporučených vedoucím práce. Klíčové vlastnosti pro výběr obvodu byly jednoduchost a schopnost přiblížit se co nejvíce požadované charakteristice. Jako finální obvod pro realizaci bylo zvoleno schéma na obrázku 6.1, které bylo konstrukčně nejjednodušší a které bylo hned od počátku doporučováno vedoucím práce. Drobná zlepšení, které přinášely jiná zapojení nebyly úměrné jejich složitosti.



Obrázek 6.1: Obvod pro ekvalizaci optického vysílače

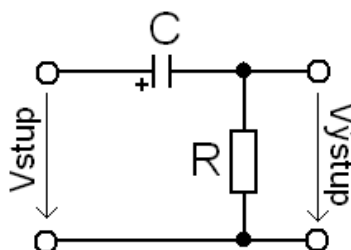
Návrh obvodu byl prováděn v programu Qucs, který umožňuje i simulaci obvodu a okamžité vykreslení charakteristiky do grafu. Při návrhu byly voleny hodnoty kondenzátoru C_1 , a rezistorů R_1 a R_2 . Kondenzátor C_1 ovlivňuje mezní frekvenci, při které poklesne zisk obvodu o 3 dB a začne tlumit nižší frekvence. Odpozem R_1 se řídí spodní hranice pro zisk obvodu a odpor R_2 mění úroveň celé charakteristiky. Zvolené hodnoty jednotlivých součástek pro finální verzi ekvalizéru jsou $C_1 = 33 \text{ pF}$, $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$ a $R_2 = 47 \Omega$.

Základem tohoto obvodu je RC filtr 1. řádu, který je možno vidět na obrázku 6.2. Řád filtru určuje, s jakou přesností jsou modelovány jeho přenosové charakteristiky. Filtry 1. řádu mají malou strmost boků (-20dB/dek), což je však pro naše potřeby dostatečné. Impedanci RC filtru lze spočítat pomocí vzorce [23]:

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C} \quad (6.1)$$

a mezní frekvenci, při které poklesne zisk obvodu o 3dB spočítáme podle vztahu:

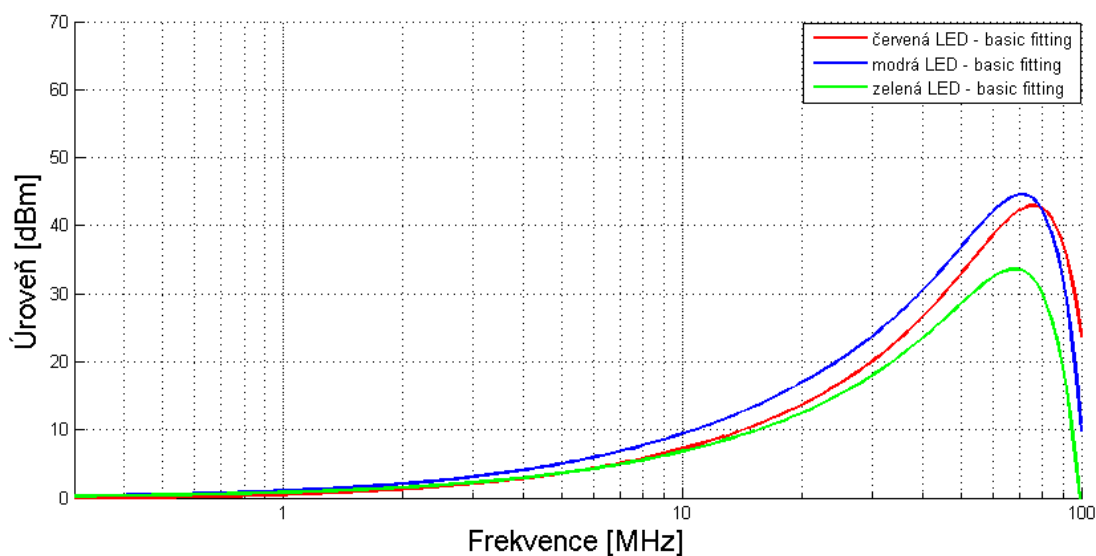
$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC} \quad (6.2)$$



Obrázek 6.2: Schéma RC filtru - horní propust [23]

Při volbě hodnot součástek pro obvod ekvalizéru se vycházelo z frekvenční charakteristiky LED, viz obrázek 5.5. Křivky tohoto grafu byly upraveny tak, aby všechny začínaly v 0 a poté byly převráceny podle osy x. Výsledek těchto operací je v příloze na obrázku A.1.

Dalším krokem bylo vyhlazení špiček a šumu v signálu, čímž byla vytvořena cílená charakteristika ekvalizéru. Vyhazení charakteristiky povede také k usnadnění návrhu a umožní přesnější porovnání navrhovaného obvodu s cílovou charakteristikou. K vyhlazení křivek byl v programu Matlab použit nástroj Basic fitting - konkrétně polynomiální 4. stupně. Cílená charakteristika je znázorněna na obrázku 6.4.



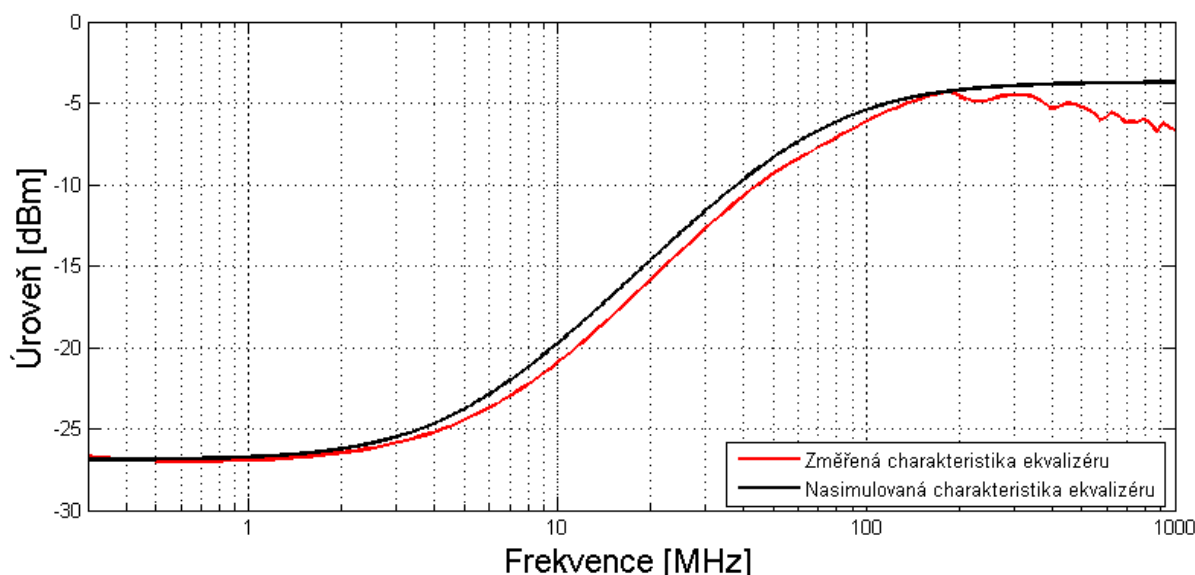
Obrázek 6.3: Basic fitting frekvenční charakteristiky LED

6.1 Frekvenční charakteristika ekvalizéru

K měření byl opět využit síťový analyzátor Rohde & Schwarz ZVB4 popsaný v kapitole 5.1.1, který byl pouze připojen na vstup a výstup ekvalizéru. Výsledná data byla vyexportována a zpracována v programu Matlab.

Při porovnání změřené a simulované frekvenční charakteristiky na obrázku 7.2 je jasné vidět, že naměřená charakteristika poměrně věrně kopíruje simulovanou. Mírné posunutí mezní frekvence, které lze z grafu vypočítat může být způsobeno nižší kapacitou kondenzátoru, než s kterou se počítalo při simulaci. Jelikož se kondenzátory vyrábí v různých řadách, jejich kapacita je udávána jen s určitou přesností. Toto posunutí mezní frekvence má při 10 MHz za následek nižší úroveň o 1 dB, u nižších frekvencí např. 2 MHz je rozdíl mezi úrovněmi měřeného a simulovaného obvodu téměř nulový.

Kromě drobného zvlnění na konci charakteristiky a mírnému posunu mezní frekvence, způsobené pravděpodobně konstrukcí obvodu, tedy ekvalizér odpovídá návrhu.



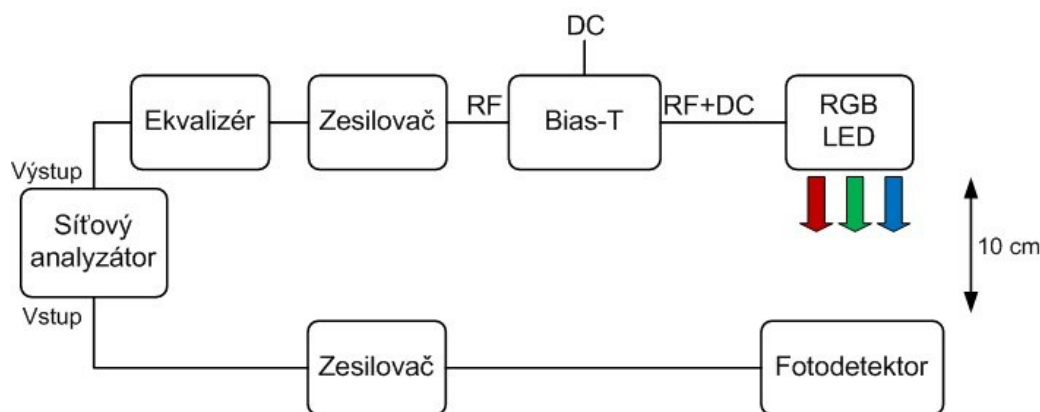
Obrázek 6.4: Frekvenční charakteristika ekvalizéru

7 Frekvenční charakteristika LED s ekvalizérem

Tato kapitola je věnována měření vlivu ekvalizéru na frekvenční charakteristiku LED. Je zde porovnání původní charakteristiky z předchozí kapitoly s upravenou frekvenční charakteristikou pomocí sestrojeného ekvalizéru. Jsou zde popsány i zesilovače OPA847, které zde byly použity pro zesílení úrovně signálu na původní hodnoty.

7.1 Měření frekvenční charakteristiky LED s ekvalizérem

Jelikož sestrojený ekvalizér vyrovnává charakteristiku tím, že utlumí nízké frekvence až o 27 dB, je třeba celý signál opět zesílit a z toho důvodu jsou na vstupu i výstupu analyzátoru zapojeny zesilovače. Měřící pracoviště bylo zapojeno dle blokového schématu na obrázku 8.1. Výstup síťového analyzátoru Rohde & Schwarz ZVB4 byl připojen na ekvalizér, který utlumil nízké frekvence a zesilovač OPA847 celý signál zesílil. Signál se poté v Bias-T Mini-Circuits ZX85-12G-S+ spojil s napájecím napětím pro LED a poté byl signál pomocí LED vysílán. Fotodetektor THORLABS PDA10A-EC byl použit pro příjem signálu, po kterém následoval druhý zesilovač OPA847 pro další zesílení. Přijatá a zesílená data poté byly zpracovány síťovým analyzátozem.



Obrázek 7.1: Blokové schéma měření frekvenční charakteristiky LED s ekvalizérem

7.1.1 Zesilovače – OPA847

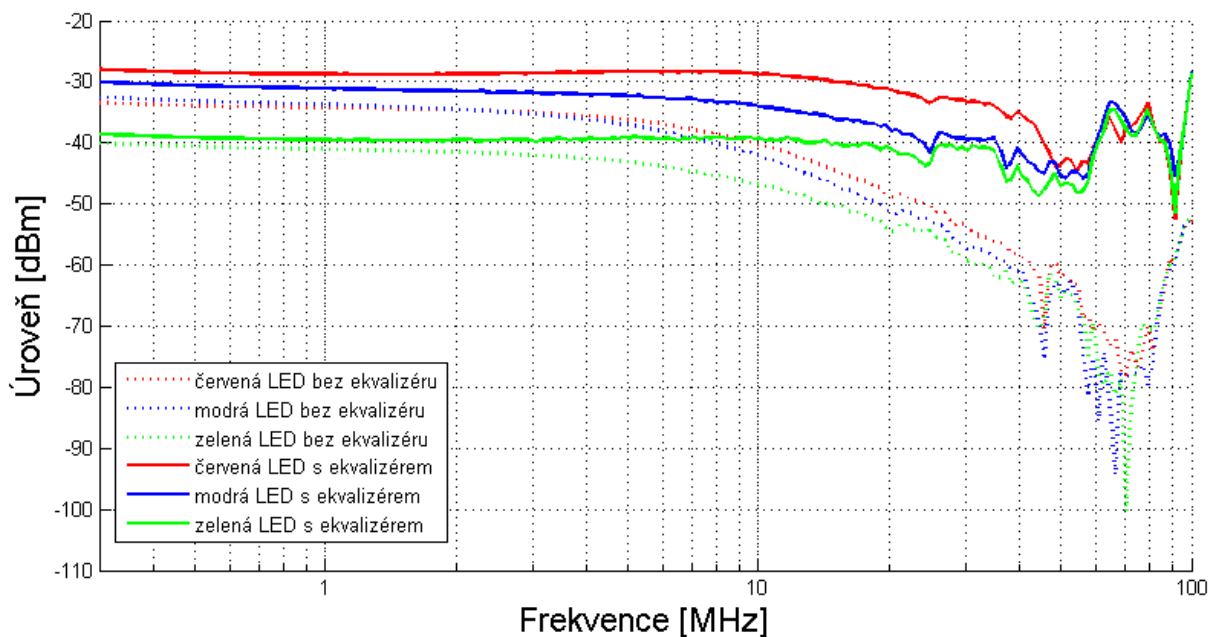
OPA847 kombinuje velkou šířku pásma a velký výkon signálu s nízkým vstupním šumovým napětím při použití pouze 18mA napájecího proudu. Tento zesilovač také obsahuje volitelný vypínací pin, který sníží napájecí proud na méně než 1% z původní hodnoty pro maximální úsporu energie. [24]

Tabulka 7.1: Specifikace OPA847 [24]

Šířka pásma	600 MHz
Rychlost přeběhu	950V/ μ s
GBP	3.9 GHz
Vstupní šumové napětí	0.85nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$
Zkreslení	-105 dBc (5 MHz)

7.2 Výsledky měření frekvenční charakteristiky LED s ekvalizérem

Z výsledků měření na obrázku 7.2 je patrné, že u všech barev se charakteristika vyrovnala a díky zesilovačům na vstupu i výstupu analyzátoru je i úroveň nepatrně vyšší než u původního signálu. Je také vidět, že obvod vyrovnal i velké špičky ve vysokých frekvencích a například u zelené LED, která dosahovala až -100 dBm při 70 MHz je nyní s ekvalizérem úroveň přibližně -35 dBm. Dosažená šířka pásma pro hladinovou úroveň -3 dBm je 11 MHz, což je v porovnání s původními 6 MHz značné zlepšení.



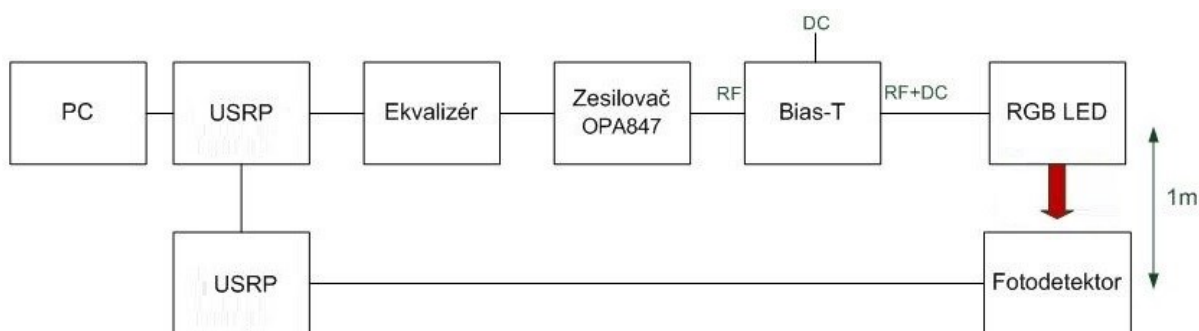
Obrázek 7.2: Frekvenční charakteristiky LED s ekvalizérem a bez něj

8 Modulace

V této kapitole je popsáno měření modulací od zapojení pracoviště, přes jednotlivé komponenty použité při měření, až po výsledky a zhodnocení celého měření. Porovnává se zde vliv ekvalizace na modulace a je zde využito i dat z předchozích měření.

8.1 Měření modulací

K měření modulací bylo použito zapojení popsané na obrázku 8.1. Ke generování i příjmu signálu jsou zde použity USRP-2921. Bias-T Mini-Circuits ZX85-12G-S+ se zde opět stará o spojení signálu se stejnosměrným proudem pro napájení LED. Měření bylo provedeno na vzdálenost 1 metr, pouze s červenou LED, kvůli nejlepším výsledkům z předchozích měření. První měření proběhlo bez ekvalizéru a bez zesilovače, aby bylo možné porovnat výsledky. V dalším měření už byl zapojen ekvalizér i zesilovač OPA847, ovšem kvůli vysoké citlivosti USRP tentokrát nemohl být použit zesilovač na straně přijímače. Při volbě nosné frekvence se vycházelo z předchozího měření frekvenční charakteristiky a nosná frekvence byla zvolena tak, aby se co nejvíce projevil vliv ekvalizéru. Nosná frekvence tedy byla zvolena 6 MHz, což je hranice, kdy klesla úroveň signálu o 3 dB. S ekvalizérem došlo k poklesu o 3 dB až při 11 MHz. Díky ekvalizéru bychom tedy měli dosáhnout větší šířky pásma a lepších přenosových parametrů.



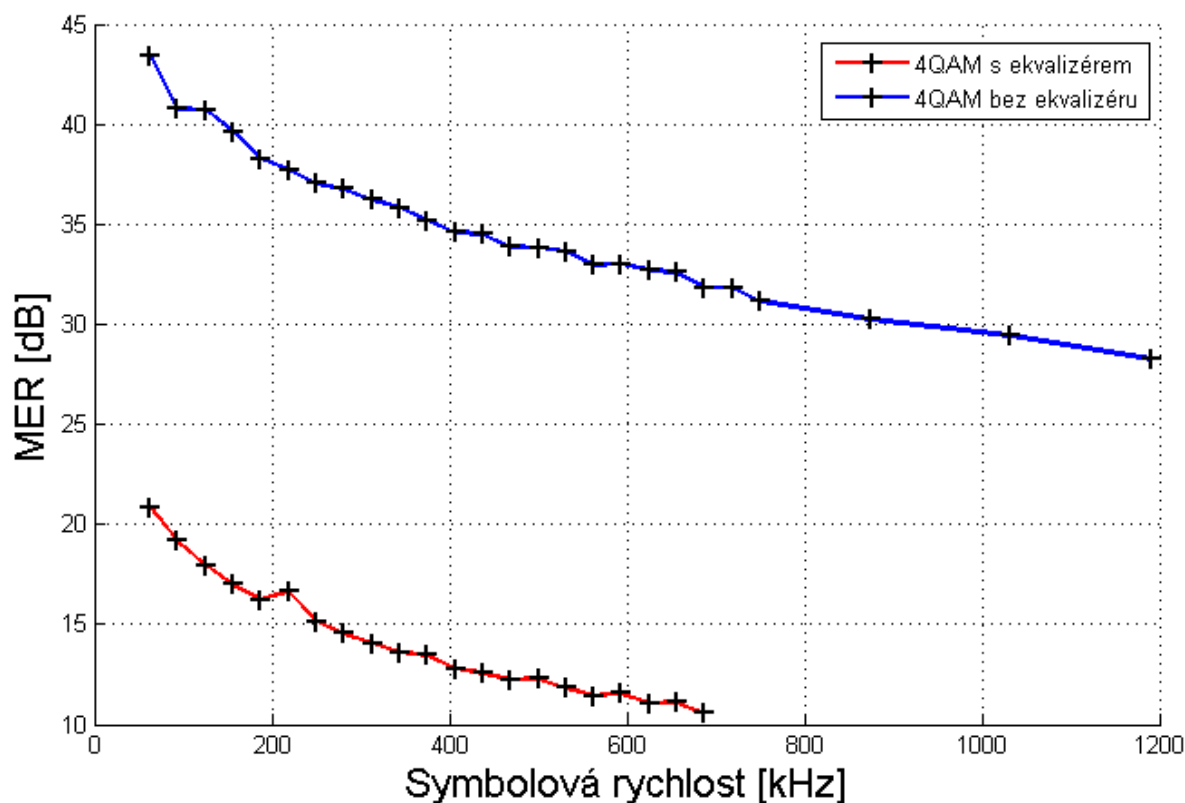
Obrázek 8.1: Blokové schéma zapojení při měření modulací

8.1.1 National Instruments USRP-2921

USRP Je řada softwarově definovaných rádiových zařízení navržených a prodávaných společností Ettus Research a její mateřské společnosti National Instruments. V podstatě jde o laditelný RF transceiver s vysokofrekvenčním AD a DA převodníkem pro streamování I a Q signálů na hostitelský počítač přes 1/10 Gigabit Ethernet. Základními vlastnostmi vysílače je frekvenční rozsah 2,4 GHz až 2,5 GHz a 4,9 GHz až 5,9 GHz, který je stejný i pro přijímač. Vysílač dále disponuje maximálním výstupním výkonem 50 mW až 100 mW (17 dBm až 20 dBm) pro oba rozsahy. Další parametry udávané výrobcem jsou uvedeny v tabulce B. 1, v příloze B. [25]

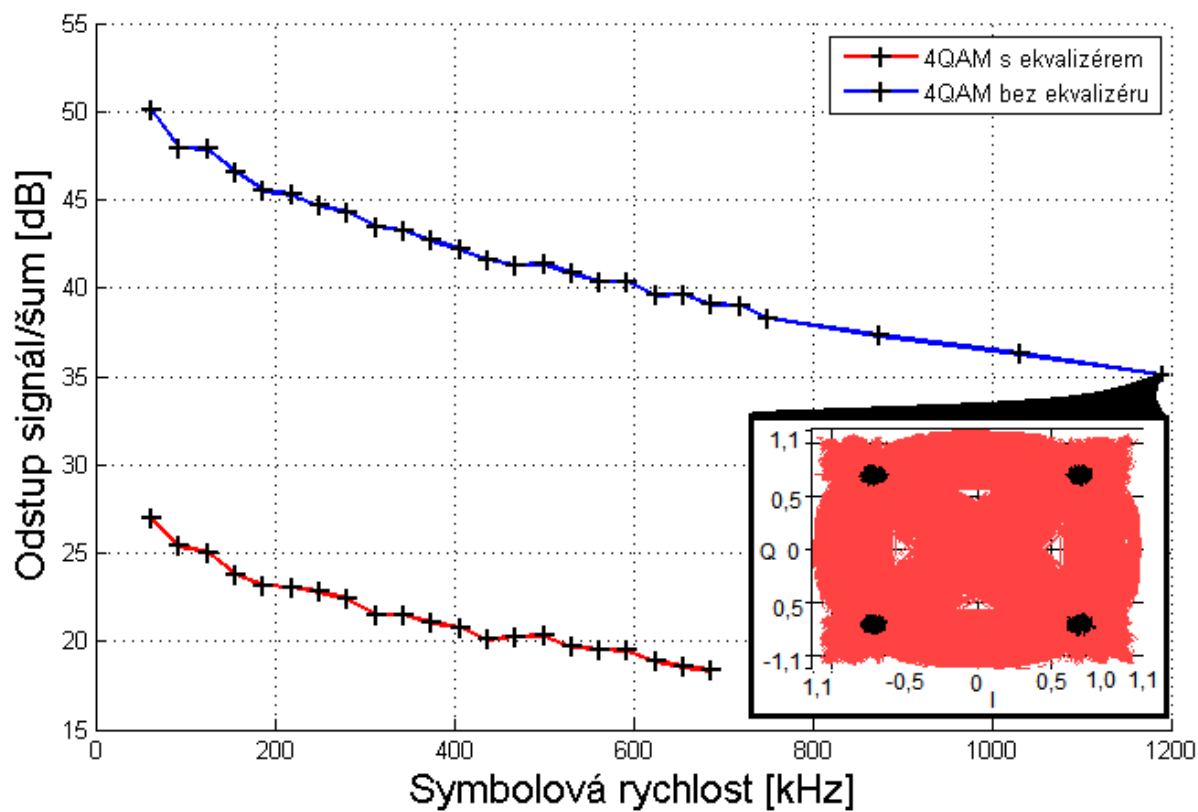
8.2 Výsledné grafy

Z grafu na obrázku 8.2 je na první pohled patrné, že MER je při použití ekvalizéru nižší a se zvyšující se symbolovou rychlostí dále klesá. To je pravděpodobně zapříčiněno absencí zesilovače na straně přijímače, což má za následek nízkou úroveň přijatého signálu. Je také možné, že ekvalizér a zesilovač přivedly do signálu další šum, což má také za následek snížení MER. Pro lepší výsledky by tedy bylo vhodné namísto OPA847 použít výkonnější nízkošumový zesilovač, který by vrátil úroveň signálu na původní hodnotu, nebo k měření využít jiný přístroj a použít zesilovač i na straně přijímače.



Obrázek 8.2: Změřený graf závislosti MER na symbolové rychlosti.

Jelikož modulační chybovost MER není nic jiného než odstup signálu od šumu SNR v digitálně modulovaném signálu, grafy z obrázků 8.2 a 8.3 spolu do jisté míry korespondují. Na obrázku 8.3 je také znázorněn konstelační diagram 4QAM při komunikaci bez použití ekvalizéru s nosnou frekvencí 6 MHz a symbolovou rychlostí 1190 kHz. Při měření s ekvalizérem se při symbolové rychlosti větší než 600 kHz začal objevovat fázový šum, který se projevuje rotačním rozmazáním konstelačních bodů, což vedlo k přerušení komunikace.



Obrázek 8.3: Změřený graf odstup signál/šum v závislosti na symbolové rychlosti.

Závěr

V teoretické části této práce jsou popsány základní principy komunikace viditelným světlem a je zde tato technologie porovnávána jak s rádiovou komunikací, tak i s technologií IrDA, která má k VLC poměrně dosti blízko. Jsou zde také popsány jednotlivé části vysílače a přijímače pro komunikaci viditelným světlem. Poslední část teorie je zaměřena na standard IEEE 802.15.7, který kromě základních vlastností a bezpečnostních omezení definuje i několik topologií používaných ve VLC a jsou zde popsány i některé modulační schémata vhodné pro komunikaci viditelným světlem. Z informací uvedených v teorii vyplývá, že vysokovýkonné LED používané ve VLC mají malou šířku pásma, což se v současné době řeší buď pomocí filtrů eliminujících vliv luminoforu na straně přijímače, nebo pomocí ekvalizace vysílače.

Praktická část začíná měřením spektra a PI charakteristik červené, modré a zelené LED. Z měření vyplývá, že červená LED měla nejmenší šířku pásma, zato však měla nejlineárnější průběh PI charakteristiky, naopak zelená LED disponovala největší šířkou pásma, avšak její PI charakteristika už nebyla v porovnání s modrou a červenou tak lineární, což může mít negativní vliv na modulaci. Z měření dále vyplývá, že volbou RGB LED předejdeme nejen vlivu zpoždění luminoforu, který se používá u bílých LED, ale budeme schopni využít současně všechny tři barvy LED ke komunikaci. Toto řešení však předpokládá využití barevných filtrů na straně přijímače propouštějících pouze požadované vlnové délky.

Další kapitola popisuje měření frekvenční charakteristiky, ze které je patrné omezení šířky pásma kvůli klesající úrovni ve frekvencích nad 6 MHz. Z tohoto důvodu je potřeba použít ekvalizér, který charakteristiku vyrovná, čímž se zvětší i šířka pásma. Této frekvenční charakteristiky se poté využívá i při návrhu ekvalizéru, nejprve však bylo nutné charakteristiku upravit a vytvořit z ní charakteristiku cílenou. Po sestrojení obvodu byla opět změřena jeho frekvenční charakteristika, která byla dále porovnávána se simulací. Takto byl z několika sestrojených obvodů vybrán ten s nejlepšími výsledky a následně byl použit pro další měření a testování přenosových parametrů. Následovalo měření frekvenční charakteristiky LED s ekvalizérem, a jelikož ekvalizér pouze tlumil nízké frekvence a propouštěl vysoké, bylo nutno na straně přijímače i vysílače použít zesilovač, aby se úroveň signálu vrátila na svou původní hodnotu, nebo i výše. Z výsledků měření je patrné, že ekvalizér charakteristiku vyrovnal, čímž se zvětšila i šířka pásma. Výsledky tohoto měření tedy prokázaly, že ekvalizace je jednou z možností, jak navýšit šířku pásma a s tím spojenou vyšší přenosovou rychlost.

V posledním měření bylo testováno, jaký vliv bude mít ekvalizér, resp. větší šířka pásma, na modulaci. Díky vysoké citlivosti měřicího zařízení však nebylo tentokrát možné použít zesilovač na straně přijímače. Z toho důvodu muselo měření proběhnout s nižší úrovní přijatého signálu, což mělo negativní dopad na výsledky. Z naměřených hodnot je zřejmé, že hodnota MER s rostoucí symbolovou rychlostí klesá. Při měření bez preekvalizéru s nosnou frekvencí 6 MHz bylo možné dosáhnout symbolové rychlosti až 1190 KHz. U měření s ekvalizérem bylo dosaženo symbolové rychlosti pouze 687,5 KHz, než se přijímaný signál stal nečitelným. Z výsledků měření je tedy patrné, že ekvalizér bez dostatečného zesílení signálu zhorší přenos modulací kvůli vloženému útlumu obvodu do přenosové trasy. Lepších výsledků by se tedy dalo dosáhnout za použití nízkošumového zesilovače s vyšším ziskem, který by vrátil utlumený signál, zpět na jeho původní úroveň, nebo k měření použít jiný přístroj

a signál zesílit i na straně přijímače, bohužel ani jedno ze zmiňovaných nebylo během měření k dispozici.

Práce ukázala, že pomocí ekvalizace lze poměrně jednoduše dosáhnout větší šířky pásma optického vysílače. Je ovšem potřeba utlumený signál opět zesílit na jeho původní úroveň, což současně vede i k zesílení šumu. Pro dosažení co nejlepších výsledků a zlepšení přenosových parametrů je tedy nutno použít dostatečně výkonný nízkošumový zesilovač, který signál zesílí na jeho původní úroveň bez nežádoucího šumu. Možností je i sestrojení složitějšího aktivního ekvalizéru, který bude schopen signál i zesílit, ovšem návrh a konstrukce takového obvodu svou složitostí překračuje rozsah bakalářské práce.

Z informací nabitých při psaní této práci na mě VLC působí jako perspektivní technologie, která by v budoucnu mohla najít uplatnění v mnoha oblastech. Dalším krokem vývoje v návaznosti na tuto práci by mohla být ekvalizace na straně přijímače, čímž by se také mohlo dosáhnout větší šířky pásma a celkového zlepšení přenosových parametrů.

Použitá literatura

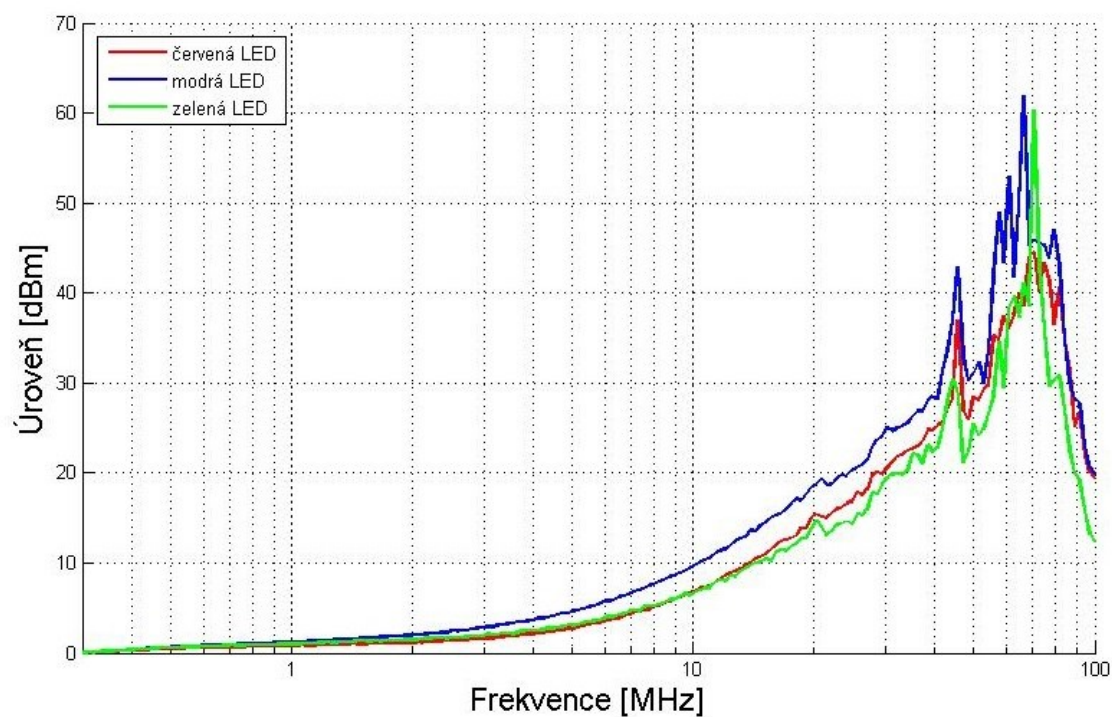
- [1] Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Fotofon [online]. c2017 [cit. 13. 04. 2017]. Dostupný z: <https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Fotofon&oldid=14858628>
- [2] IEEE 802.15.7 Task Group. LMSC, LAN/MAN Standards Committee (Project 802) [online]. Copyright © [cit. 14.04.2017]. Dostupné z: <http://www.ieee802.org/15/pub/TG7.html>
- [3] Visible Light Communication | InTechOpen. InTech - Open Science Open Minds | InTechOpen [online]. Copyright © The Author [cit. 14.04.2017]. Dostupné z: <https://www.intechopen.com/books/advanced-trends-in-wireless-communications/visible-light-communication>
- [4] Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Barevné spektrum [online]. c2017 [cit. 13. 04. 2017]. Dostupný z WWW: https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Barevn%C3%A9_spektrum&oldid=14793299
- [5] GHASSEMLOOY, Zabih, W POPOOLA a S RAJBHANDARI. Optical wireless communications: system and channel modelling with MATLAB. Boca Raton: CRC Press, 2012, xlii, 517 s. ISBN 978-1-4398-5188-3.
- [6] Oct. 9, 1962: First Visible LED Is Demonstrated | WIRED. [online]. [cit. 13. 04. 2017]. Dostupné z: <https://www.wired.com/2012/10/oct-9-1962-the-first-visible-led-is-demonstrated/>
- [7] Wikipedie: Otevřená encyklopedie: LED [online]. c2017 [cit. 13. 04. 2017]. Dostupný z: <https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=LED&oldid=14624131>
- [8] CHOW, C, C. YEH a Y LIU. Digital Signal Processing for Light Emitting Diode Based Visible Light Communication. Digital Signal Processing for Light Emitting Diode Based Visible Light Communication [online]. [cit. 13. 04. 2017]. Dostupné z: <http://web.it.nctu.edu.tw/~cwchow/journal/leos2012.pdf>
- [9] Wikipedie: Otevřená encyklopedie: OLED [online]. c2017 [cit. 14. 04. 2017]. Dostupný z: <https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=OLED&oldid=14522433>
- [10] Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Fotodioda [online]. c2016 [cit. 14. 04. 2017]. Dostupný z: <https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Fotodioda&oldid=14398237>
- [11] HUANG, Xingxing, Zhixin WANG, Jianyang SHI, Yiguang WANG a Nan CHI. 16 Gbit/s phosphorescent white LED based VLC transmission using a cascaded pre-equalization circuit and a differential outputs PIN receiver. Optics Express. 2015, 23(17), 22034-. DOI: 10.1364/OE.23.022034. ISSN 1094-4087. [cit. 13. 04. 2017]. Dostupné z: <https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=oe-23-17-22034>

- [12] HONGLEI LI, Honglei Li, Xiongbín Chen XIONGBIN CHEN, Junqing Guo JUNQING GUO, Danying Tang DANYING TANG, Beiju Huang BEIJU HUANG a Hongda Chen HONGDA CHEN. 200 Mb/s visible optical wireless transmission based on NRZ–OOK modulation of phosphorescent white LED and a pre-emphasis circuit. Chinese Optics Letters. 2014, 12(10), 100604-100607. DOI: 10.3788/COL201412.100604. ISSN 1671-7694. [cit. 13. 04. 2017]. Dostupné z: <http://www.opticsjournal.net/Abstract.htm?id=OJ1409110000283z6B9E>
- [13] LI, Honglei, Xiongbín CHEN, Junqing GUO, Hongda CHEN, Beiju Huang BEIJU HUANG a Hongda Chen HONGDA CHEN. A 550 Mbit/s real-time visible light communication system based on phosphorescent white light LED for practical high-speed low-complexity application. Optics Express. 2014, 22(22), 27203-. DOI: 10.1364/OE.22.027203. ISSN 1094-4087. [cit. 13. 04. 2017]. Dostupné také z: <https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=oe-22-22-27203>
- [14] IEEE 802.15. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-04-15]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.15
- [15] SPONSOR a LAN/MAN STANDARDS COMMITTEE OF THE IEEE COMPUTER SOCIETY. IEEE standard for local and metropolitan area networks. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2011. ISBN 9780738166650.
- [16] HANUS, Stanislav. Bezdrátové a mobilní komunikace. Brno: Vysoké učení technické, 2001. ISBN 8021418338.
- [17] OCEAN OPTICS. USB4000 Fiber Optic Spectrometer: Installation and Operation Manual [online]. [cit. 2017-04-16]. Dostupné z: <http://oceanoptics.com/wp-content/uploads/USB4000OperatingInstructions.pdf>
- [18] THORLABS. Compact Photodiode Power Head with Silicon Detector [online]. 2016 [cit. 2017-04-17]. Dostupné z: <https://www.thorlabs.com/drawings/4684b7bfdfb3b850-BCB40904-5056-2306-D93E22A3F91AFF98/S120VC-SpecSheet.pdf>
- [19] THORLABS PM100USB Operation Manual [online]. [cit. 2017-04-18]. Dostupné z: <https://www.thorlabs.de/drawings/9e8c18c163449302-BD56F4D0-5056-2306-D9977B8B9479449A/PM100USB-Manual.pdf>
- [20] R&S®ZVA / R&S®ZVB / R&S®ZVT Vector Network Analyzers [online]. [cit. 2017-04-18]. Dostupné z: https://cdn.rohde-schwarz.com/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_manuals/gb_1/z/zva_2/old_versions_4/ZVA_ZVB_ZVT_OperatingManual_en_29.pdf
- [21] Mini-Circuits. Coaxial Bias-Tee ZX85-12G+ [online]. [cit. 2017-04-18]. Dostupné z: <https://www.minicircuits.com/pdfs/ZX85-12G+.pdf>
- [22] THORLABS. PDA10A(-EC) Si Amplified Fixed Detector [online]. [cit. 2017-04-18]. Dostupné z: <https://www.thorlabs.com/drawings/48aae3bf623db774-0F5238AB-5056-2306-D984A060D3BACC08/PDA10A-EC-Manual.pdf>

- [23] Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Horní propust [online]. c2016 [cit. 18. 04. 2017]. Dostupný z: https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Horn%C3%AD_propust&oldid=13865723
- [24] Texas Instruments. OPA847: Wideband, Ultra-Low Noise, Voltage-Feedback OPERATIONAL AMPLIFIER with Shutdown [online]. 2002 [cit. 2017-04-20]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/opa847.pdf>
- [25] Universal Software Radio Peripheral - Wikipedia. [online]. [cit. 2017-04-22]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Universal_Software_Radio_Peripheral
- [26] National Instruments. NI USRP-2921 [online]. [cit. 2017-04-22]. Dostupné z: <http://www.ni.com/pdf/manuals/375867c.pdf>
- [27] What is SMD LED and High Power LED? What are the benefits? Why Eastar mainly choose High power LED as light source? Eastar LED Co., Ltd. Guangdong [online]. [cit. 2017-04-22]. Dostupné z: <http://www.eastarled.com/faq/54.html>

Seznam příloh

Obrázek A.1:	Inverzní graf frekvenční charakteristiky LED.....	II
Tabulka B.1:	Parametry USRP-2921 [26].....	III



Obrázek A.1: Inverzní graf frekvenční charakteristiky LED

Obrázek B.1: Parametry USRP-2921 [26]

Vysílač	
Frekvenční rozsah	2,4 GHz až 2,5 GHz a 4,9 GHz až 5,9 GHz
Frekvenční krok	<1 kHz
Maximální výstupní výkon (P out)	
2,4 GHz až 2,5 GHz	50 mW až 100 mW (17 dBm až 20 dBm)
4,9 GHz až 5,9 GHz	50 mW až 100 mW (17 dBm až 20 dBm)
Zisk	0 dB až 35 dB
Krok zisku	0,5 dB
Přesnost frekvence	2,5 ppm
Maximální okamžitá šířka pásma v reálném čase	
16 bitová šířka vzorku	25 MS/s
8 bitová šířka vzorku	50 MS/s
Přijímač	
Frekvenční rozsah	2,4 GHz až 2,5 GHz a 4,9 GHz až 5,9 GHz
Frekvenční krok	<1 kHz
Zisk	0 dB až 92,5 dB
Krok zisku	2 dB
Maximální vstupní výkon (P in)	-15 dBm